



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y  
MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA,  
BIOTECNOLOGÍA Y MATERIALES

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PLANTA MODULAR DE DESALINIZACIÓN DE  
AGUA DE MAR CON PANELES SOLARES Y CULTIVOS HIDROPÓNICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

DIEGO ANDRÉS FELIPE OÑATE VALENZUELA

**PROFESOR GUÍA:**

ALVARO MARÍA OLIVERA NAPPA

**PROFESORA CO-GUÍA:**

MELANIE ALEJANDRA COLET LAGRILLE

**COMISIÓN:**

FRANCISCO JAVIER ESTEBAN GRACIA CAROCA

SANTIAGO DE CHILE

2019

## Resumen

La presente memoria de título evalúa la posible instalación de una planta desalinizadora de agua de mar ubicada en las cercanías del pueblo de Carrizalillo, ubicado en la comuna de Freirina, III región de Atacama, Chile. El poblado tiene un número de habitantes cercano a 200 personas y está ubicado a aproximadamente 5 kilómetros de la costa, lo cual lo convierte en un sitio atractivo para el caso base. El estudio técnico contempló diferentes metodologías de desalinización, técnicas de cultivos agrícolas y el funcionamiento de paneles solares. En cuanto a la evaluación económica, se implementó un modelo en MATLAB, el cual permite verificar la rentabilidad del proyecto y la estabilidad de esta frente a diferentes escenarios. Respecto al estudio legal, este se realizó con ayuda de los planos reguladores del sector, para así conocer si es posible hacer el proyecto en la zona. Finalmente, se analizó el compromiso social del proyecto con la herramienta de análisis integral (HAIN).

La motivación del proyecto nace directamente de la escasez hídrica, fenómeno a escala mundial del cual Chile no queda exento. Actualmente en la zona estudiada se producen cortes de agua debido al incremento de la población en el sector en temporadas de vacaciones o fin de semanas largos. Además, existen dos localidades cercanas que comparten la falta de agua en el sector, Chañaral de Aceituno y Caleta Carrizalillo. Cada poblado tiene una población cercana a 200 personas.

El estudio considera utilizar una pequeña porción del total del agua desalada para realizar cultivos en medio hidropónico de tomates y lechugas, estos corresponden al sustento económico del proyecto, debido a que las ganancias por venta de agua no son suficientes. La elección de cultivos se debe principalmente a que corresponden a ejemplos de fruta y verdura de hojas, respectivamente. La adición de estudios de cultivo se debe principalmente al empobrecimiento del trabajo agrícola en el sector a través de los años, debido principalmente a la falta de agua.

Los resultados muestran que el proyecto es factible en un escenario en donde se realiza la venta de alimentos para un público objetivo que involucra a las tres localidades, este escenario presenta un VPN de 25.000.000 [CLP] y una TIR de 31% para un horizonte de 10 años, recuperando la inversión a final del segundo año. El estudio de planos reguladores enseña una zona cercana a la costa que se ubica en el centro de los poblados, lo que facilita la distribución de tomates y lechugas. Finalmente, la HAIN indica que la mayor preocupación a tener en consideración es respecto a la salmuera, el principal desecho de la desalinización. Además, para que el proyecto aporte una riqueza social se considera la posible ampliación de la producción de agua potable y/o la adición de paneles solares extras para otorgar energía eléctrica a la zona.

## Agradecimientos

Me gustaría comenzar agradeciendo por este logro a mi familia, por estar siempre apoyándome durante este largo camino. A mi padre por cada vez que me fue a buscar por quedarme estudiando, a mi madre por estar siempre atenta que no me falte nada, a la Yei por ayudarme en los ramos biólogos y corregirme esta tesis y a la Toto por dejarme vivir en su casa para trabajar más tranquilo.

También quisiera agradecer a Valentina, en verdad fuiste una personita que estuvo presente durante toda mi estadía en el departamento IQBT, alegraste mis días desde que te conocí y ahora, en las últimas, sigues estando para distraerme y motivarme a ser un profesional completo. Te amo mucho mi amor, eres lo mejor que me ha pasado. No puedo quitarle tampoco el mérito a la Candelita, por alegrarme cada vez que nos vemos con su cariño tan puro, aunque sea un poco bruta, te quiero igual negrita.

Destacar al profe Álvaro, el cual me apoyo desde un principio en este proyecto y nunca me dejó la puerta cerrada, gracias por tu disposición siempre. Al Sebita, que siempre me ayudó y me motivó a seguir con el proyecto, cada idea que me planteabas o consejos que me diste me sirvieron mucho, en verdad eres bacán y una parte importante de esta tesis. A la profe Melanie, la cual cumplió un rol fundamental en mi formación profesional, me enseñó a tener disciplina, a mantener el orden y la calma siempre. A la profe Andrea, sin ella no sería posible esta titulación jaja, también por enseñarme que las cosas siempre se pueden hacer de cosas distintas, siempre se puede dar lo mejor de uno para salir de la caja en la que nos encierran. Finalmente, a Panchito Gracia, por apañar y hacerme tanto reír.

Agradecer de corazón a Tareq, Cesar, Pelao y Mauro. Han estado conmigo desde el colegio y hemos pasado juntos un montón de momentos. En las buenas y en las malas. Vernos siempre o casi nunca. No importa, son lo mejor que me dejó el colegio y espero tenerlos conmigo toda la vida. Reconocimiento especial también a Los Jinetas, que han estado años entregándome momentos muy gratos, no tan seguido como quisiéramos, pero les agradezco de todas maneras, ¡Yo sé que vienen muchos más!

No puedo pasar por alto al grupo de la W, gracias al Panchi, la Gabi, la Rafa, el Juampa, el Dani, el Benja, el Pancho, el Nefta, el Nico y la Cami. Han hecho de mi estos años mucho más amenos y alcohólicos. Nunca olvidaré los viajes que hicimos, los carretes que tuvimos y los momentos inolvidables que hemos vivido. ¡Cada uno de ustedes representa un recuerdo muy feliz que llevaré en mi corazón y mente siempre que vuelva a pensar en mis tiempos en la U, de verdad gracias! El apoyo que tuvimos para pasar los ramos y hacer las tareas alivianaron considerablemente mi carga académica, me hicieron querer el departamento y encontrar una segunda familia en la U.

Quisiera agradecer también a la banda “Los Rajadiablos” que en mi último año de universidad me hicieron reencontrarme con la música, en especial a Yasser, que más que un líder de banda y baterista frustrado jajaja se convirtió en un amigo, en un muy buen amigo. Muchas gracias por todo cabros, nunca pensé tocar en el costa azul ni en la U. Sigán así, mucho éxito a todos y cada uno, tanto como músico, como profesionales.

Finalmente agradecer a mi familia de La Serena, cumplieron un rol fundamental en la culminación de la tesis. Gracias Carito, Alvarito, Jose y tía Iris. ¿Y por qué no? A la gente de Carrizalillo, que con su hospitalidad y buena onda me motivaron aún más con este proyecto.

## Tabla de Contenido

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | Introducción.....   | 1  |
| 1.1    | Antecedentes .....  | 1  |
| 1.1.1  | Contexto.....   | 1  |
| 1.2    | Objetivos .....   | 2  |
| 1.2.1. | Objetivo General.....   | 2  |
| 1.2.2. | Objetivos Específicos.....  | 2  |
| 2.     | Marco Teórico.....  | 2  |
| 2.1.   | Desalinización de agua.....   | 2  |
| 2.1.1. | Destilación Multi-Efecto (MED) .....                                  | 2  |
| 2.1.2. | Desalinización Flash Multi-Etapa (MSF) .....                          | 3  |
| 2.1.3. | Osmosis Inversa (RO) .....  | 4  |
| 2.2.   | Metodología de Desalinización por Empresa Aguas Antofagasta S.A. .... | 4  |
| 2.3.   | Cultivo por Hidroponía.....   | 5  |
| 2.4.   | Paneles Solares.....  | 5  |
| 2.5.   | Evaluación Económica .....  | 6  |
| 2.6.   | Estudio de Riesgo del Proyecto .....                                  | 6  |
| 2.6.1. | Dificultades de Membrana en el Diseño Técnico .....                   | 7  |
| 2.6.2. | Dificultades en el Mantenimiento del Diseño Técnico .....             | 9  |
| 2.6.3. | Dificultades en el Mantenimiento de Paneles Solares.....              | 10 |
| 2.7.   | Planes Reguladores.....   | 12 |
| 2.8.   | Herramienta de Análisis Integral (HAIN).....                          | 12 |
| 3.     | Metodología.....  | 14 |
| 4.     | Resultados .....  | 15 |
| 4.1.   | Visita a Carrizalillo .....   | 15 |
| 4.2.   | Comparación de Métodos de Cultivo .....                               | 15 |
| 4.3.   | Requerimiento Hídrico en los cultivos.....                            | 16 |
| 4.4.   | Estimación de tamaño de cultivo .....                                 | 16 |
| 4.5.   | Diseño de planta desaladora de agua.....                              | 17 |
| 4.6.   | Estudio económico del caso base.....                                  | 17 |
| 4.7.   | Optimización de parámetros.....                                       | 18 |
| 4.7.1. | Escenario considerando un préstamo bancario .....                     | 20 |
| 4.8.   | Estudio de sensibilidad de variables.....                             | 21 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.9.   | Estudio de planos reguladores .....                           | 23 |
| 4.10.  | Resultados de la Herramienta de Análisis Integral (HAIN)..... | 25 |
| 5.     | Discusiones .....   | 27 |
| 6.     | Conclusión .....  | 29 |
| 7.     | Bibliografía.....   | 30 |
| 8.     | Anexos .....  | 34 |
| 8.1.   | Encuesta realizada en Carrizalillo .....                      | 34 |
| 8.2.   | Demanda hídrica de la zona .....                              | 36 |
| 8.3.   | Consumo de cultivos en la zona .....                          | 36 |
| 8.4.   | Comparación de cultivos.....                                  | 37 |
| 8.4.1. | Cultivo de tomate convencional .....                          | 37 |
| 8.4.2. | Cultivo de lechuga convencional .....                         | 38 |
| 8.4.3. | Cultivo de tomate hidropónico.....                            | 38 |
| 8.4.4. | Cultivo de lechuga hidropónica .....                          | 39 |
| 8.5.   | Obtención de agua por evo-transpiración .....                 | 39 |
| 8.5.1. | Obtención de coeficiente de cultivo .....                     | 39 |
| 8.5.2. | Cálculo de coeficiente de cultivo .....                       | 40 |
| 8.5.3. | Obtención de evo-transpiración de referencia .....            | 40 |
| 8.5.4. | Cálculo de evo-transpiración de referencia .....              | 45 |
| 8.5.5. | Cálculo de agua por evo-transpiración .....                   | 45 |
| 8.6.   | Estimación de tamaño de cultivo .....                         | 46 |
| 8.7.   | Diseño del proyecto.....                                      | 47 |
| 8.8.   | Evaluación económica del proyecto .....                       | 48 |
| 8.8.1. | Venta de cultivo .....  | 48 |
| 8.8.2. | Costos capitales de construcción para cultivo.....            | 48 |
| 8.8.3. | Costos operacionales para cultivo .....                       | 50 |
| 8.8.4. | Costos capitales de planta de desalinización .....            | 52 |
| 8.8.5. | Costos operacionales de planta de desalinización .....        | 52 |
| 8.8.6. | Costos asociados a personal de trabajo.....                   | 53 |
| 8.8.7. | Depreciación de equipos.....                                  | 53 |
| 8.8.8. | Cálculo de amortización .....                                 | 54 |
| 8.9.   | Estimación de paneles solares necesarios .....                | 54 |
| 8.10.  | Desarrollo de Herramienta de Análisis Integral (HAIN) .....   | 55 |

|   |    |
|---|----|
| 8.10.1. Conciencia Social: ¿Realizaría esta acción si fuese parte de la comunidad afectada?                       | 55 |
| 8.10.2. Reflexión Crítica: ¿Cuáles son las consecuencias de este proyecto? ¿Qué precauciones se tienen que tener? | 55 |
| 8.10.3. Integración: ¿Qué conflicto podría despertar esta alternativa en las partes interesadas?                  | 56 |
| 8.10.4. Creatividad: ¿Qué nuevas soluciones pueden hacerse? ¿Hay efectos no previstos?                            | 56 |
| 8.10.5. Desarrollo Integral: ¿Se incluye en la toma de decisiones a todos los grupos sociales?                    | 57 |
| 8.10.6. Desarrollo Equilibrado: ¿Se aporta de manera balanceada en todos los grupos sociales?                     | 57 |
| 8.10.7. Desarrollo Sostenible: ¿Se compromete de alguna manera el desarrollo del futuro?                          | 57 |
| 8.10.8. Bien Común: ¿Cómo se afecta a la generación y distribución de riquezas sociales?                          | 57 |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama de funcionamiento para tecnología MED.                 | 3  |
| Figura 2. Diagrama de funcionamiento de MSF. <sup>[5]</sup>               | 3  |
| Figura 3. Diagrama de funcionamiento de RO.                               | 4  |
| Figura 4. Esquema de presiones presentes en un módulo de osmosis inversa. | 8  |
| Figura 5. Representación gráfica de la HAIN. <sup>[17]</sup>              | 13 |
| Figura 6. Diagrama de diseño de planta desalinizadora.                    | 17 |
| Figura 7. Cultivo de tomate hidropónico.                                  | 49 |
| Figura 8. Cultivo en cajones de lechugas hidropónicas.                    | 50 |

## Índice de Imágenes

|  |    |
|--|----|
| Imagen 1. Ubicación geográfica de Carrizalillo. <sup>[4]</sup>   | 1  |
| Imagen 2. Limpieza de paneles solares. <sup>[15]</sup>   | 11 |
| Imagen 3. Anomalía térmica en un panel solar.  | 12 |
| Imagen 4. Distribución espacial de las localidades con respecto a la localización probable de la planta. <sup>[27]</sup> | 24 |
| Imagen 5. Planes reguladores de la zona estudiada. <sup>[27]</sup>   | 25 |
| Imagen 6. Encuesta realizada en las localidades.   | 35 |
| Imagen 7. Detalles de simulación de crédito Banco Estado.  | 54 |

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Comparación entre método de cultivo convencional e hidropónico para tomates y lechugas. | 15 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2. Cotas para valores de variables a optimizar.....                      | 19 |
| Tabla 3. Valores de parámetros de función optimizadora.....                    | 19 |
| Tabla 4. Valores óptimos de las variables de estudios obtenidos.....           | 20 |
| Tabla 5. Valores iniciales de las variables de estudios.....                   | 22 |
| Tabla 6. Demanda hídrica diaria de Carrizalillo.....                           | 36 |
| Tabla 7. Demanda hídrica diaria de caleta Chañaral de Aceituno.....            | 36 |
| Tabla 8. Consumo de tomate por habitante en el sector.....                     | 36 |
| Tabla 9. Consumo de lechugas por habitantes en el sector.....                  | 37 |
| Tabla 10: Consumo de macronutrientes para tomate en tierra.....                | 38 |
| Tabla 11. Consumo de macronutrientes para lechuga en tierra.....               | 38 |
| Tabla 12. Macronutrientes consumidos por cultivos de tomates hidropónicos..... | 38 |
| Tabla 13. Macronutrientes consumidos por cultivos de lechuga hidropónica.....  | 39 |
| Tabla 14. Parámetros de Kc para cultivos.....                                  | 40 |
| Tabla 15. Consumo anual de macronutrientes.....                                | 51 |
| Tabla 16. Costos capitales para planta desalinizadora.....                     | 52 |
| Tabla 17. Costos operacionales para el proceso de desalinización.....          | 52 |
| Tabla 18. Costos por salario de trabajadores.....                              | 53 |
| Tabla 19. Tabla de depreciaciones de bienes capitales.....                     | 53 |
| Tabla 20. Casos de estudio para requerimientos de paneles solares.....         | 55 |

# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

### 1.1.1 Contexto

La escasez hídrica se ha convertido en un problema a nivel mundial. A finales de enero de 2018 Ciudad del Cabo, en Sudáfrica anunció su pronto acercamiento al inminente escenario del “Día Cero”, es decir, total ausencia de agua. Chile no está lejos de vivir dicha situación en un futuro, habiendo actualmente escasez de agua en algunas zonas del país.<sup>[1]</sup>

La Dirección General de Aguas (DGA) decretó en febrero de 2018 que existen en total 61 comunas en Chile afectadas por el fenómeno, principalmente en las zonas del norte y centro del país, en las cuales se ven perjudicados 2.617.934 habitantes, es decir, aproximadamente un 15% de la población del país.<sup>[2]</sup>

En los últimos años se ha apreciado una disminución en las precipitaciones y en los caudales de las cuencas en la región de Atacama respecto al promedio anual desde el año 1980 hasta la fecha. Esta disminución afecta tanto a los sectores agrícolas, como a los usuarios de las cuencas de Copiapó y Huasco. Para enfrentar esta situación, se está trabajando en los sistemas de agua potable rural (APR) desde la Seremi de Agricultura.<sup>[3]</sup>

A partir de la situación anteriormente mencionada, se realizó una búsqueda en el área costera de la región de Atacama (III Región), con el fin de encontrar poblados pequeños cercanos al mar como público objetivo. Se selecciona un poblado llamado Carrizalillo ubicado aproximadamente a 5 km de la costa, en la comuna de Freirina (Ver Imagen 1). Esta localidad presenta problemas hídricos en temporadas de vacaciones y feriados largos, puesto que la población del sector aumenta debido a que existen avistamientos de ballenas en la costa de Chañaral de Aceituno.



Imagen 1. Ubicación geográfica de Carrizalillo. <sup>[4]</sup>



## 1.2 Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

El objetivo principal corresponde a verificar la factibilidad tanto técnica, económica y legal de la implementación de una planta de desalinización de agua de mar con funcionamiento a partir de energía solar para la obtención de agua potable y cultivos en medio hidropónicos. Desarrollando ingeniería desde la base, reconociendo las distintas etapas para la materialización de una idea.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Plantear un proyecto de ámbito social y sin fines de lucro en la localidad de Carrizalillo bajo el cumplimiento de las normativas y disposiciones del estado chileno.
- Desarrollar un estudio técnico del proyecto, verificando su potencial elaboración en este ámbito considerando la localización y los planes reguladores de la zona.
- Definir un modelo económico sólido para estudiar la factibilidad económica del proyecto.
- Determinar parámetros relevantes para la realización del proyecto, reconociendo los distintos escenarios de operación en el funcionamiento de este.
- Analizar el enfoque social a través de la herramienta HAIN.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Desalinización de agua

Hoy en día existen diversas fuentes de agua no potable que a través de tratamientos pueden ser convertidas en una fuente hídrica para procesos, agricultura e incluso consumo. Las aguas residuales, aguas de pozos y el agua de mar corresponden a las principales opciones para la obtención de agua potable, siendo la desalinización de agua de mar el método más confiable en el mundo. <sup>[5]</sup>

Las técnicas de potabilización más utilizadas corresponden a: Destilación multi-efecto (MED), desalinización flash multi-etapa (MSF), y osmosis inversa (RO). Dichos métodos han evolucionado en el tiempo, lo que ha permitido una disminución de costos en el tratamiento, en donde inicialmente el metro cúbico de agua desalinizada tenía un valor entre 0,5 – 0,8 [US \$], hoy estos valores alcanzan el rango de 0,2 – 0,35 [US \$] por el mismo volumen. El avance de la tecnología en las fuentes de energías renovables impactaría de manera positiva a este tipo de procesos, pudiendo disminuir aún más el costo de producción. <sup>[5]</sup>

A continuación, se describen las distintas técnicas de potabilización mencionadas en el párrafo anterior.

#### 2.1.1. Destilación Multi-Efecto (MED)

El proceso MED corresponde a la técnica más antigua de desalinización, los primeros reportes datan de mediados del siglo XIX. Se basa en condensar el vapor generado de agua de mar en una serie de etapas o “efectos”, en cámaras con distintas presiones y temperaturas (Ver Figura 1)

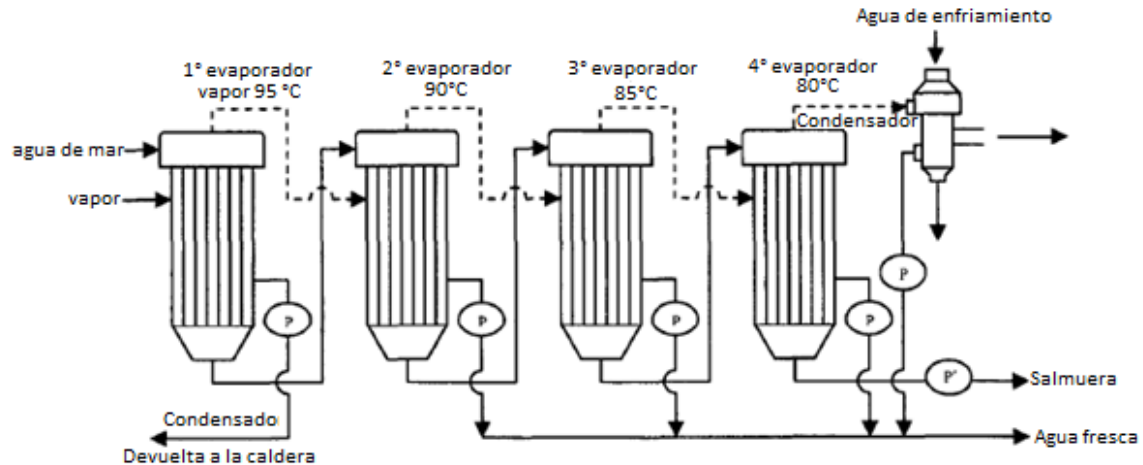


Figura 1. Diagrama de funcionamiento para tecnología MED.

Los principales problemas presentes en MED se relacionan con la corrosión y las incrustaciones de compuestos sobresaturados que se generan, como por ejemplo  $CaSO_4$ . Esta desventaja es muy importante debido al intenso contacto entre el vapor y la salmuera con los intercambiadores de calor, lo que disminuye la eficiencia energética del proceso. [5]

### 2.1.2. Desalinización Flash Multi-Etapa (MSF)

Esta técnica comenzó a practicarse en la década de 1960, convirtiéndose en el más común de los procesos de desalinización de agua de mar durante mucho tiempo debido a su confiabilidad y simplicidad. El principio de operación consiste en una serie de cámaras flash, en donde el vapor generado del agua de alimentación es progresivamente despresurizado hasta ser finalmente condensado. Una fracción de la salmuera es recirculada, para una mayor recuperación de agua y otra parte es devuelta al mar (Ver Figura 2). [5]

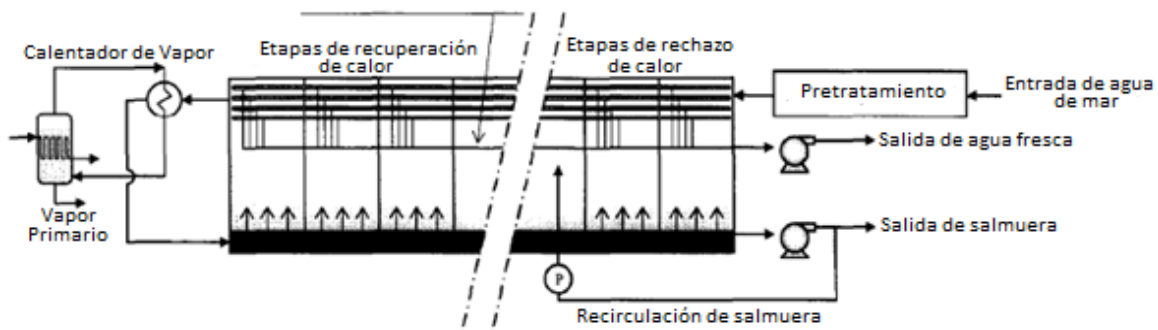


Figura 2. Diagrama de funcionamiento de MSF. [5]

La principal ventaja de MSF es que la transferencia de calor no ocurre mediante la conducción de superficies calientes, por lo que no existe ineficiencia por incrustaciones de sales dentro del sistema. La corrosión es más fácil de controlar en comparación a MED porque el diseño es menos complejo. Sin embargo, la mayor desventaja corresponde la baja razón entre agua producida y vapor consumido, convirtiendo a MSF en la técnica de mayor consumo energético y por lo tanto más cara. [5]

### 2.1.3. Osmosis Inversa (RO)

A pesar de que el primer registro de desalinización de agua de pozo con RO se logró a fines de la década de 1960, no fue hasta 1980 que se hizo competitiva en comparación a las técnicas de desalinización debido al aumento de permeabilidad en las membranas utilizadas.

El mecanismo de funcionamiento de esta metodología corresponde a la aplicación de una presión mayor a la “presión osmótica” en el agua de mar, logrando una separación de sales disueltas y agua a través de una membrana permeable. En un principio las presiones requeridas rondaban los 120 [bar], hoy en día estos valores han disminuido considerablemente, llegando a 20 [bar] para el mismo tratamiento de aguas provenientes de pozos (Ver Figura 3<sup>[5]</sup>)

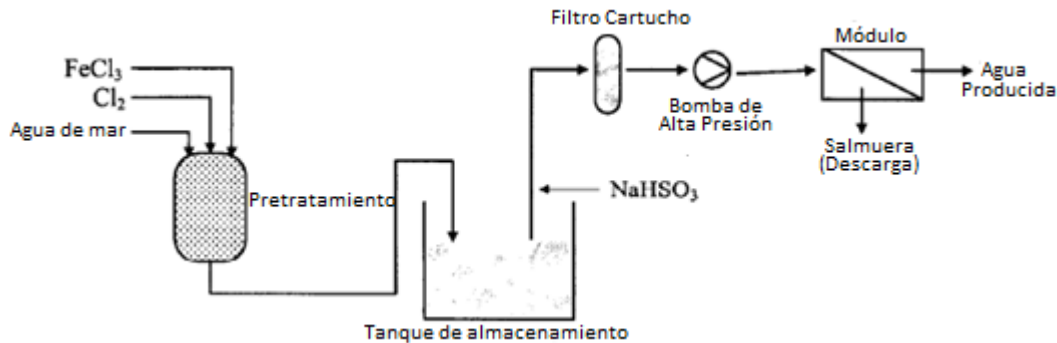


Figura 3. Diagrama de funcionamiento de RO.

La ventaja de esta técnica corresponde al bajo costo de producción de agua, teniendo valores entre 0,5 – 0,7 [US\$] por metro cúbico de agua producida. El rango para MSF y MED, dependiendo del costo energético puede variar entre 1,0 – 1,4 [US \$] por el mismo volumen. A pesar de que el consumo de energía del bombeo es considerable, es bajo en comparación a los procesos de evaporación.

La principal desventaja de RO corresponde a la sensibilidad de la membrana a las incrustaciones de sustancias, como por ejemplo sólidos suspendidos y compuestos de cloro, los cuales provocan la oxidación de esta. Lo anterior hace absolutamente necesaria una etapa de pretratamiento, la cual disminuye considerablemente este tipo de percances.<sup>[5]</sup>

### 2.2. Metodología de Desalinización por Empresa Aguas Antofagasta S.A.

El proceso de desalinización utilizado actualmente en la Planta Desaladora Norte (PDN) ubicada en las cercanías de Antofagasta comienza con una etapa de captación, la cual consiste en la aducción de agua de mar del tipo toma abierta a través de una estructura cilíndrica de hormigón de 4 [m] de diámetro y 5 [m] de altura llamada “torre de captación”, esta se ubica a 413 [m] desde la costa y se conecta con la planta a través de una tubería de polietileno de alta densidad (HDPE). El agua captada llega a una piscina de volumen 192 [m<sup>2</sup>] mediante la utilización 12 bombas fabricadas de acero inoxidable dúplex para evitar la corrosión, las tuberías de succión y descarga de bomba están hechas de fibra de vidrio (PRFV), se estima que la presión de trabajo de cada bomba corresponde a 5,5 [kg/cm<sup>2</sup>].<sup>[6]</sup>

Posteriormente se inicia la etapa de pretratamiento, la cual existe para disminuir la posibilidad de obstrucciones y daño en las membranas de desalinización. Se utilizan 34 filtros multimedia

construidos de hierro dúctil y recubiertos con poliurea para evitar su corrosión. Cada filtro contiene tres capas de material filtrante: 20 [cm] de arena de cuarzo como soporte, 50 [cm] de arena de cuarzo fina y 30 [cm] de antracita. Los filtros trabajan a una presión aproximada de 3,5 [kg/cm<sup>2</sup>], son capaces de retener partículas de un diámetro mayor a 10 [μm] y pueden limpiarse a través de un sistema de retrolavado con salmuera. Luego, el agua es transportada hacia 22 filtros de cartucho, los cuales trabajan en un rango presión entre 2 [kg/cm<sup>2</sup>] y 3 [kg/cm<sup>2</sup>], permitiendo retener partículas mayores a 5 [μm] de diámetro. <sup>[6]</sup>

Finalmente se tiene la etapa de desalinización con osmosis inversa, en la cual el agua ingresa mediante tuberías PRFV hacia total de 12 bombas de acero dúplex que trabajan a una presión máxima de 70 [kg/cm<sup>2</sup>]. Se utilizan 11 bastidores de osmosis inversa, cada uno con 3 subsecciones de tubos que separan el agua permeada de la salmuera. Cada subsección contiene 30 tubos, los cuales a su vez tienen 7 membranas de osmosis inversa, obteniendo un total de 6.930 membranas que permiten producir agua potable a un caudal de 52.000 [m<sup>3</sup>/día]. <sup>[6]</sup>

### 2.3. Cultivo por Hidroponía

Corresponde a una técnica de cultivo sin la utilización de suelos. Consiste en utilizar un medio inerte, usualmente agua, en el cual se añade una solución de nutrientes con elementos esenciales para el desarrollo normal de la planta. Este método de cultivo busca solucionar el problema de control hídrico-nutricional y la presencia de patógenos en los cultivos por interacción con el suelo.

Frente a la técnica convencional de cultivo, este sistema presenta ventajas, entre las cuales se destacan: proveer un nivel de humedad constante a la raíz con independencia a el clima, evitar el gasto excesivo de agua y fertilizantes, reducir enfermedades producidas por patógenos del suelo y mejorar la calidad de producción. <sup>[7]</sup>

En este proyecto se contempla que una parte del agua desalinizada se utilizará para cultivos hidropónicos, en donde se plantarán tomates y lechugas para las localidades de la zona. La elección de las especies a plantar se justifica principalmente porque corresponden a un ejemplo de una verdura de fruta y una de hoja, respectivamente, lo que permite tener dos familias distintas en el caso de estudio. Además, ambos cultivos presentan gran disponibilidad de información bibliográfica en cuanto a parámetros de consumo hídrico y nutricional.

### 2.4. Paneles Solares

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por no necesitar un medio material para transportarse, estas pueden viajar a través del vacío presente en el espacio desde el sol hasta la superficie de la Tierra. Este tipo de onda se propaga transportando energía, la cual puede ser aprovechada mediante celdas fotovoltaicas.

Una celda está diseñada con materiales capaces de transportar electrones hacia su banda de conducción mediante la incidencia de luz solar, creando corriente eléctrica. Un conjunto de celdas instaladas en serie o paralelo dan origen a un panel fotovoltaico, los cuales son encapsulados en vidrios templados y montados sobre estructuras, que ubicadas una al lado de otra dan origen a un arreglo solar.

La conversión energética no es total, esta depende de factores como: condiciones ambientales, el polvo presente en el panel, presencia de sombras, humedad del ambiente y temperatura. En particular, el último factor tiene un efecto negativo sobre el rendimiento de la celda. El parámetro de rendimiento se define de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\text{Potencia eléctrica}}{\text{Irradiancia} \cdot \text{Área Panel}} \quad (1)$$

A medida que la temperatura aumenta, el voltaje máximo que puede alcanzar el panel disminuye, con lo que también decrece la potencia generada. [8]

## 2.5. Evaluación Económica

Para poder realizar el estudio de rentabilidad se hace necesario el uso de indicadores para la cuantificación. El valor presente neto (VPN) corresponde a la diferencia entre el valor presente de las entradas de efectivo y sus salidas a lo largo de un tiempo determinado. Es usado dentro del presupuesto capital para realizar un análisis de rentabilidad de una inversión o un proyecto planeado.

El VPN corresponde a una herramienta efectiva por dos razones, la primera porque permite considerar el valor del dinero a través del tiempo, traduciendo flujos futuros a efectivo de hoy; y la segunda es porque proporciona un número concreto que permite la comparación de rentabilidad entre dos proyectos. El cálculo de VPN se define de la siguiente manera:

$$VPN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} \quad (2)$$

En donde  $I_o$  corresponde a la inversión inicial,  $F_t$  los flujos netos de efectivo a lo largo de su vida útil,  $k$  la tasa de descuento conocida como “costo de oportunidad”,  $n$  es el número de periodos que dura el proyecto y  $t$  el periodo específico. [9]

Otro indicador que será de utilidad corresponde a la tasa interna de retorno (TIR), la cual permite saber si es viable invertir en un determinado negocio. Corresponde a un porcentaje que mide la viabilidad de un proyecto, determinando la rentabilidad de cobros y pagos generados por una inversión.

Para entender mejor el cálculo de la TIR es necesaria la Ecuación 2, esta realiza el mismo cálculo llevando el VPN a cero, es decir:

$$\exists r \in \mathbb{R} \text{ tal que } \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (3)$$

En este caso, si la TIR es mayor que la tasa de descuento utilizada sólo entonces conviene invertir en el proyecto. [10]

## 2.6. Estudio de Riesgo del Proyecto

Es necesario determinar qué factores podrían poner en peligro la continua operación de una planta desalinizadora. La identificación de estos escenarios presentan información relevante a la hora de

poner en marcha el proyecto puesto que se detallan las medidas necesarias de prevención y que consecuencias conllevan cada una de ellas.

A continuación, se presentan algunas de las complicaciones más significativas que ocurren durante la operación de una planta de desalinización de agua de mar y la metodología para evitarlas. Además, se incluyen indicaciones sobre el mantenimiento de paneles solares.

#### 2.6.1. Dificultades de Membrana en el Diseño Técnico

El principal desafío en las plantas de desalinización de agua de mar corresponde a la prevención del desarrollo de partículas en los filtros, a este se le conoce como “biofilm”. Se entiende por *biofilm* como una colonia de células bacterianas que se adhieren a una superficie. La mayor consecuencia corresponde al decaimiento de la eficiencia en la separación por membrana, principalmente por la disminución de área de filtrado causada por las incrustaciones. Un filtro obstruido debe ser limpiado. La remoción se lleva a cabo mediante una limpieza violenta de químicos.<sup>[11]</sup>

Es altamente recomendable realizar limpiezas por retrolavado frecuentemente durante la operación de la planta, esto provee mayores beneficios que realizar limpiezas químicas fuera de servicio. Estos beneficios corresponden a: mejor funcionamiento de la planta de RO, la reducción de la caída de presión y la presión de entrada en la etapa, mayor vida útil en las membranas y, por ende, una menor frecuencia en el reemplazo de estas, lo que conlleva a una inversión costosa. Es por esto que se deben tomar las debidas precauciones para prevenir la generación de *biofilm*.

La empresa IDE Technologies, empresa multinacional especializada en el desarrollo y operación de avanzadas plantas de desalinización y tratamiento de agua a escala industrial, utiliza diversos tipos de metodologías para evitar la presencia de *biofilms* en sus membranas, disminuyendo considerablemente sus costos operacionales y las inversiones capitales de sus proyectos, en el área de desalinización de agua se destacan las siguientes: Limpieza de Osmosis Directa (Direct Osmosis Cleaning, DOC) y Osmosis Directa con Alta Salinidad (Direct Osmosis High Salinity, DOHS) Cada una de estas técnicas se basa teóricamente en cuatro tipos de presiones presentes en la membrana, las cuales, a partir de la siguiente ecuación, determinan la dirección del flujo a través de la membrana:

$$NDP = PG_r - PO_r - PG_p + PO_p \quad (4)$$

En donde el término *NDP* corresponde a la diferencia de presión en la membrana, por lo tanto, hacia que dirección atraviesa el flujo en el filtro. *PG* corresponde a la presión manométrica presente, esta puede ser en la alimentación (*r*) o en el permeado (*p*). *PO* se refiere a la presión osmótica, la cual está presente en ambas secciones igualmente. La Figura 4 presenta una ilustración para facilitar el entendimiento de la ecuación.

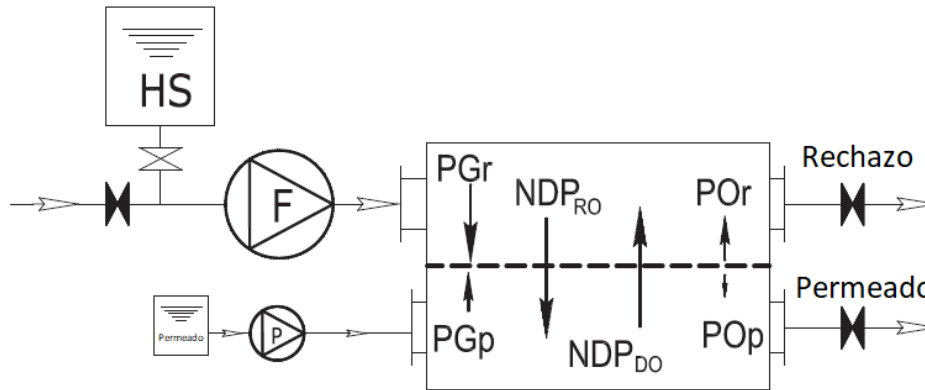


Figura 4. Esquema de presiones presentes en un módulo de osmosis inversa.

De acuerdo a esto, un valor positivo para la ecuación genera un traspaso de osmosis inversa desde el agua de alimentación al permeado, mientras que un valor negativo correspondería a un retrolavado por el fenómeno de osmosis directa.<sup>[13]</sup>

#### 2.6.1.1. Tecnología DOC

Este tipo de limpieza se genera cerrando la válvula de salida para el permeado, inmediatamente la bomba de permeado (P) aumenta la presión manométrica ( $P_{Gp}$ ) en la sección. Este incremento debe realizarse hasta casi igualar  $P_{Gr}$ . Luego de esto, la presión osmótica de la entrada ( $PO_r$ ) se vuelve dominante en la ecuación por su contenido salino, dando origen a una osmosis directa. Esta metodología es aplicable a aguas de alimentación cuya concentración de sal es alta, como lo es el agua de mar, puede realizarse durante el funcionamiento de la planta y repetirse cada pocas horas debido a que tarda sólo unos segundos.

#### 2.6.1.2. Tecnología DOHS

Esta tecnología se realiza insertando una solución con alta presión osmótica a través de la bomba de alimentación (F), lo que genera un fenómeno de osmosis directa. Esta metodología es aplicable para agua de pozo, aguas residuales y agua de mar, debido a que no depende de la calidad de agua de alimentación.

Para una mayor eficiencia en DOHS es necesario mantener la presión osmótica de alimentación ( $PO_r$ ) lo suficientemente alta. Además, la válvula de salida del rechazo debe permanecer abierta para aumentar la velocidad de corte. Se utilizan dos bombas en simultaneo durante el funcionamiento, la bomba centrífuga de alta presión de flujo en la alimentación (F) y la bomba osmótica (P), la cual empuja el permeado desde la zona de baja presión manométrica en el canal permeado ( $P_{Gp}$ ) hasta la zona de alta presión manométrica en la alimentación ( $P_{Gr}$ ), generando un ángulo de  $90^\circ$  entre los flujos, lo que quita las partículas incrustadas en la membrana de forma efectiva.

Cabe destacar, que la alta presión osmótica generada a través de la membrana en el canal de alimentación provoca plasmólisis en las bacterias debido a la deshidratación. Este fenómeno ocurre debido a que el agua presente en la célula sale a través de la pared celular debido a la diferencia salina con el medio, produciendo una contracción del citoplasma o directamente una ruptura del plasma. Las bacterias que experimentan plasmólisis no son capaces de reproducirse.

Esta metodología se ha probado en más de 20 plantas de desalinización con RO en el mundo por más de 12 años. Los resultados muestran ausencia total de *biofilm* en las membranas. Además, el consumo energético en plantas que trabajan frecuentemente con limpieza por DO es bajo, siendo DOHS el mecanismo más recomendado.

### 2.6.2. Dificultades en el Mantenimiento del Diseño Técnico

Si bien a nivel mundial existen referencias de la vida útil para una planta de tratamiento de agua potable por osmosis inversa que alcanzan de 20 a 25 años, no existen estudios específicos para sus equipos al respecto. De esta forma, los valores de la vida útil indicados se refieren a la planta en su conjunto (estructuras, emisarios, cañerías, estanques, equipos, entre otros).

Principalmente equipos como bombas, turbo bombas y compresores presentan una vida útil significativamente menor al resto de la planta, debido a que dichos equipos están expuestos a un desgaste mucho mayor por sus condiciones operacionales, ya que se encuentran a altas presiones y en contacto directo con el agua de mar. Lo anterior se traduce en altos costos debido a reparaciones correctivas o un obligado reemplazo por el rápido avance tecnológico, con el fin de disminuir el consumo del equipo.

Se utilizará un estudio realizado por la empresa Aguas Antofagasta S.A. en su planta desaladora para tener una noción para un caso real. El cuál data de las actividades de mantenimiento en las bombas de captación de agua de mar y las bombas de alta presión presentes en las etapas de filtrado. Cabe destacar que la producción de dicha planta corresponde a  $52.000 [m^3/día]$ , por lo que se estima que la cantidad de mantenciones serán mucho mayores a las presentes en la puesta en marcha del proyecto, puesto que se espera una producción menor a  $100 [m^3/día]$ .

En cuanto a las bombas de agua de mar, la planta cuenta con 11 equipos, tres de ellos instalados en el año 2002, dos en el 2006, dos más en el 2008 y el resto en el año 2010. Durante el año 2014, se realizó un mantenimiento a los 11 equipos, por lo que el periodo mínimo para dicha mantención corresponde a 4 años. Sin embargo, las bombas más antiguas presentaron fugas por primera vez en el año 2007, por lo que durante el quinto año de operación en las condiciones de captación podría decirse que ocurren fallas. Cabe destacar, que un malfuncionamiento corresponde a un hecho fortuito, por lo que esto debe ser tomado solo como apreciación. No existen registros de costos para las reparaciones correspondiente.

La planta cuenta con 8 bombas de alta presión, de las cuales tres fueron instaladas en el año 2002, dos en el 2006, dos en el 2008 y otras dos en el año 2010. Cinco de las bombas más antiguas presentan vibraciones inaceptables para una revisión del año 2015, por lo que no deben estar en funcionamiento. El año mínimo en el que ocurre alguna falla es de dos años, por lo que para este periodo ya se hace necesario un chequeo. Se destacar nuevamente la aleatoriedad de estos eventos, por lo que debe realizarse un seguimiento continuo de los equipos involucrados en esta etapa. Respecto al registro de costos, estos varían desde  $300 [UF]$  por la reparación de un motor quemado, hasta  $2.400 [UF]$  por la reparación de un eje dañado. La empresa registra que desde el año 2002 hasta el 2015, ocurrieron 5 fallas significativas en distintos equipos, con un costo total de  $5.200 [UF]$ .

Finalmente, cabe señalar que el registro realizado por la empresa identifica 102 actividades de falla/mantención/reparación para el total de ambos tipos de bombas en un periodo de 13 años. Los



costos que anteriormente no fueron mencionados corresponden a singularidades resueltas directamente por técnicos de la empresa y servicios proporcionados por la empresa Flowserve Corporation debido a parte del contrato de instalación de maquinaria industrial.<sup>[14]</sup>

### 2.6.3. Dificultades en el Mantenimiento de Paneles Solares

Las instalaciones solares fotovoltaicas se caracterizan por requerir escaso mantenimiento, siempre y cuando estén bien diseñadas. La ausencia de piezas móviles evita que exista un desgaste de la estructura, el requerimiento de cambio de piezas y la continua aplicación de lubricantes.

El mantenimiento de la instalación solar lo puede realizar el usuario final, o bien una empresa externa autorizada y capacitada a fin de no perder la garantía legal de los equipos. Es altamente recomendado subcontratar la labor de mantenimiento debido a la especialización de diversas empresas en el área, el costo que esto conlleva no suele ser elevado.

Existen tres tipos de mantenimientos que pueden ser realizados a la instalación solar. i) El mantenimiento correctivo, el cual es realizado después de haber ocurrido un fallo. Esta estrategia puede resultar económica a corto plazo, pero puede resultar en un daño irreparable en el equipo lo que lo convierte en el más costoso. ii) El mantenimiento preventivo. Esta estrategia permite detectar fallos repetitivos antes de que ocurran, también logra aumentar la vida útil de los equipos y disminuir el costo en reparaciones. iii) Finalmente, el mantenimiento predictivo, basado en la determinación de un sistema de operación para reconocer “síntomas” que puedan terminar en un fallo.

A continuación, se procederá a mencionar distintos tipos de mantenimientos preventivos para un sistema solar fotovoltaico. Cabe destacar que no se ahondará en situaciones correctivas, puesto a que estas variarán dependiendo del tipo de falla y tampoco se explicará un estudio preventivo, ya que las condiciones de operación varían en cada planta y no se conocen en exactitud las de este proyecto.<sup>[15]</sup>

#### 2.6.3.1. Limpieza periódica del panel

Es importante saber que la suciedad que se puede acumular en el panel puede reducir el rendimiento de los paneles. Las capas de polvo reducen la recepción de la irradiación solar, reduciendo la potencia del panel, sin embargo, esta disminución no suele ser significativa.

Las labores de limpieza deben ser realizadas mensualmente o luego de alguna lluvia con partículas de barro, posterior a la caída de nieve o para otros fenómenos meteorológicos similares. Esta debe hacerse con agua, sin agentes abrasivos o instrumentos metálicos. Es preferible que se haga durante las horas centrales del día, para evitar cambios bruscos de temperatura entre el agua y el panel, sobre todo en verano.



Imagen 2. Limpieza de paneles solares. <sup>[15]</sup>

#### 2.6.3.2. *Inspecciones visuales de posibles degradaciones*

Debe realizarse un seguimiento cada dos meses a los paneles, controlando que ninguna célula se encuentre en mal estado (considerando algún cristal de protección roto) debido a acciones externas. Además, se debe comprobar que el marco de los módulos se encuentre en ausencia de deformaciones o roturas.

#### 2.6.3.3. *Estructura soporte de los paneles*

Esta estructura está fabricada íntegramente con perfiles de aluminio y tornillería de acero inoxidable, por lo que no requieren mantenimiento anticorrosivo. El mantenimiento se realizará cada seis meses y consistirá en la comprobación de posibles degradaciones de la estructura, al igual que su correcta fijación mediante un correcto ajuste de la tornillería.

#### 2.6.3.4. *Control de las características eléctricas del panel*

Se realiza una inspección en el estado de las conexiones de manera anual. Dicha revisión contempla la ausencia de sulfatación y oxidación en los circuitos y las soldaduras de las células. También debe realizarse una comprobación en el estado y adherencia de los cables de los terminales para cada panel. Finalmente, se deben realizar mediciones mediante termografía infrarroja para las conexiones, esperando que ninguna supere los 60 [°C], en caso contrario dicha conexión deberá ser sustituida.

#### 2.6.3.5. *Control de la temperatura del panel*

En lo posible debe realizarse mediante termografía infrarroja cada tres meses. Se debe verificar que ningún punto del panel esté fuera de rango de temperatura permitida por el fabricante del equipo.

<sup>[15]</sup>

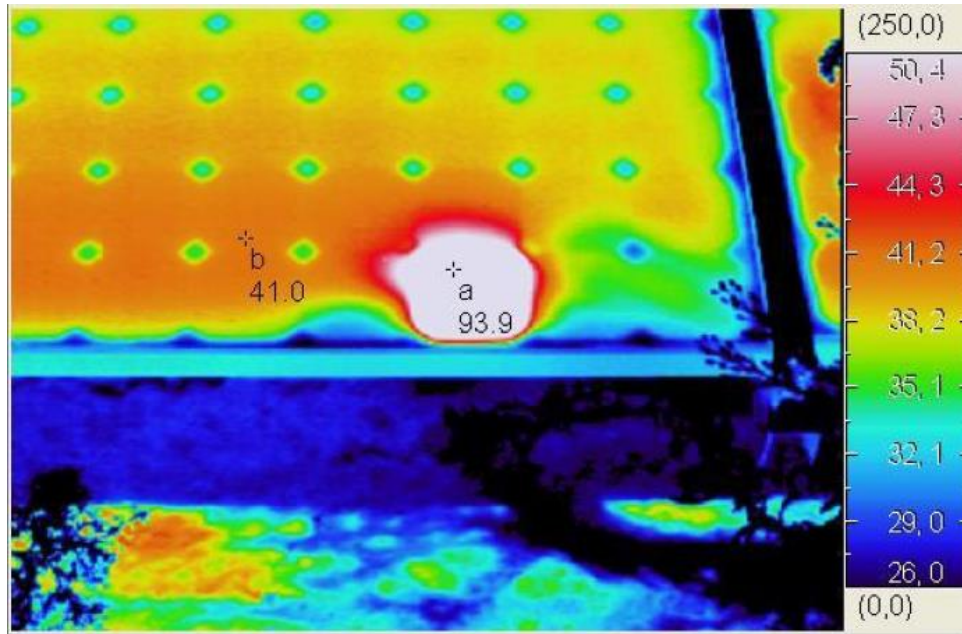


Imagen 3. Anomalía térmica en un panel solar.

## 2.7. Planes Reguladores

El Plan Regulador corresponde a un instrumento compuesto por diferentes normas sobre condiciones de higiene adecuadas y seguridad en espacios urbanos. Sus disposiciones se refieren a la utilización del terreno o zonificación, localización del equipamiento comunitario, fijación de límites urbanos y determinación de zonas para la expansión urbana.<sup>[16]</sup>

## 2.8. Herramienta de Análisis Integral (HAIN)

Corresponde a un mecanismo de estudio para la realización de un proyecto que considera su relación con la comunidad, identificando las partes interesadas o influenciadas por las consecuencias del mismo. Adicionalmente la HAIN busca establecer una conexión con el desarrollo social, considerando su sostenibilidad y equidad, con las consecuencias del proyecto en el bienestar social y las condiciones que lo permiten.

Cada proyecto deberá buscar una respuesta a cada una de las preguntas, siguiendo el orden indicado en la Figura 5. Dicha distribución se explica por una profundización de los aspectos a reflexionar, con el fin de generar conciencia en la elaboración del proyecto.<sup>[17]</sup>

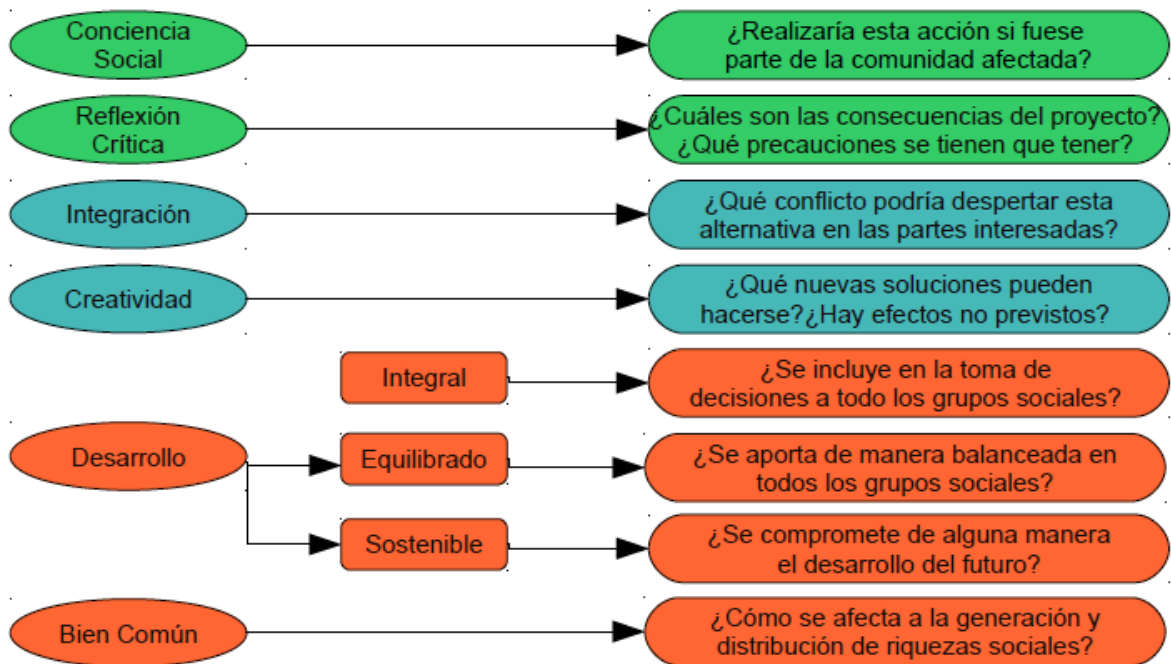


Figura 5. Representación gráfica de la HAIN. [17]

### 3. Metodología

Con el objetivo de conocer la situación que actualmente se vive en Carrizalillo el memorista realizará una visita a dicho lugar los días 6, 7 y 8 de noviembre de 2018. A través de una encuesta adjuntada en el Anexo 8.1 se logrará obtener registro de la opinión de la población respecto a su calidad de vida.

Se realizó una búsqueda bibliográfica para interiorizarse en el método de cultivo por hidroponía y los métodos de desalinización. El estudio de cultivo será contrastado con la técnica convencional en tierra para realizar la elección óptima entre ambas técnicas. Respecto a los distintos mecanismos de desalinización de agua de mar, se procederá a diseñar el proceso con membranas de RO, esto debido a que corresponde a la técnica más económica y utilizada actualmente.

El estudio comparativo agrícola se realizará con tomates y lechugas. Cabe destacar que ambas especies presentan una disponibilidad anual en el mercado, por lo que no presentarían producción estacional. Parámetros como consumo de nutrientes, requerimiento hídrico considerando pérdida por evo-transpiración y rendimiento de cultivo serán claves para la justificación de la técnica a utilizar.

Respecto al diseño del proceso de desalinización, será basado en el utilizado por la empresa chilena Aguas Antofagasta S.A. También, se realizará un estudio para conocer las condiciones legales de captación y calidad de agua. Se tendrán en consideración mecanismos que aumenten la vida útil de las membranas utilizadas en el proceso de filtración, con el fin de poder abaratar costos durante la operación de la planta.

Una vez obtenida la recopilación, se procederá a construir un modelo económico, el cual deberá estar sobrestimado con el fin de tener un escenario preventivo a posibles complicaciones en la marcha del proyecto. Se tenderá a aumentar el precio de los costos capitales y operacionales, a diferencia de las ganancias por venta de agua y cultivos, en donde se disminuirá el beneficio por ingresos.

Construido el modelo económico se traspasará al programa Matlab, de esta manera será más sencillo buscar un valor óptimo para distintas variables de interés utilizando los parámetros encontrados anteriormente. Se realizará también un estudio de sensibilidad de variables en torno al resultado obtenido, permitiendo así conocer la factibilidad económica en diversos escenarios. De esta manera se sabrán las condiciones en donde el proyecto no es conveniente de realizar. Indicadores como el valor presente neto (VPN), tiempo de reinversión y tasa interna de retorno (TIR) se hacen considerablemente atractivos en este punto del proyecto, por lo que el modelo debe estimar dichos parámetros en su funcionamiento.

La metodología anterior encuentra su culminación en un estudio de planos reguladores, esto deberá realizarse para conocer la factibilidad legal de realizar el proyecto en la zona, junto con las precauciones a tomar para la elaboración de este. También deberá ser sometido a un análisis HAIN, de esta forma se podrá caracterizar cualitativamente como “social” a la obra.

## 4. Resultados

### 4.1. Visita a Carrizalillo

En total se respondieron 31 encuestas, 18 de ellas pertenecientes a pobladores de Carrizalillo y 13 de Caleta Chañaral de Aceituno, un poblado de aproximadamente 220 personas con un mercado turístico debido a los avistamientos de ballenas en la zona.

Como principales resultados de la encuesta, se destacan: 1) La preocupación e identificación de la gente de la zona por la escasez hídrica. Actualmente se obtiene agua de un pozo salobre en las cercanías de Carrizalillo, la cual es tratada y repartida entre ambos poblados, sin embargo, en épocas donde aumenta la población flotante no hay abasto. 2) La poca oferta laboral del sector. La mayoría de los hombres se dedica al buceo y la pesca, siendo esta última limitada en temporadas de veda. Por otra parte, las mujeres se dedican al aseo de cabañas y atención de restaurantes, empleo existente sólo en temporada alta. 3) El interés en fuentes de energías renovables, principalmente con paneles solares por parte de la población residente. Consideran este tipo de energía una fuente limpia y les gustaría tener acceso a esta tecnología, puesto que en Caleta Chañaral hay problemas ocasionales de luz.

Finalmente, la visita permitió la obtención de parámetros para el diseño del proyecto como: La población de 280 habitantes en Carrizalillo, así como la población de 200 personas en otra localidad cercana llamada Caleta Carrizalillo, el consumo diario de agua en época alta, el consumo de frutas y verduras en la zona y el precio a la que esta se comercializa (Ver Anexo 8.2 y 8.3).

### 4.2. Comparación de Métodos de Cultivo

Para establecer el método de cultivo más eficiente para los cultivos de tomates y lechugas se compararon los requerimientos nutricionales e hídricos y el rendimiento entre el método de cultivo convencional y el método por hidroponía para ambos cultivos de acuerdo a la literatura:<sup>[18][19][20][21]</sup>

Tabla 1. Comparación entre método de cultivo convencional e hidropónico para tomates y lechugas.

| Especie              | Requerimiento hídrico mensual [L/unidad] | Requerimiento de Nitrógeno mensual [kg/unidad] | Requerimiento de Fósforo mensual [kg/unidad] | Requerimiento de Potasio mensual [kg/unidad] | Rendimiento de cultivo [unidad/m <sup>2</sup> ] |
|----------------------|--|--|--|--|---|
| Tomate hidropónico   | 0,51                                     | $5,58 \cdot 10^{-5}$                           | $5,98 \cdot 10^{-6}$                         | $9,49 \cdot 10^{-5}$                         | 127   |
| Lechuga hidropónica  | 1,09                                     | $3,57 \cdot 10^{-4}$                           | $1,07 \cdot 10^{-4}$                         | $4,54 \cdot 10^{-4}$                         | 18  |
| Tomate convencional  | 0,78                                     | $4,95 \cdot 10^{-4}$                           | $5,40 \cdot 10^{-4}$                         | $2,95 \cdot 10^{-4}$                         | 25  |
| Lechuga convencional | 3,87                                     | $1,64 \cdot 10^{-3}$                           | $5,62 \cdot 10^{-4}$                         | $5,62 \cdot 10^{-4}$                         | 7   |

De acuerdo a los datos el método de cultivo por hidroponía tiene menores requerimientos y es más eficiente, efectivamente existe un ahorro en el uso de fertilizantes y agua para los cultivos. Para más detalles ver Anexo 8.4.

#### 4.3. Requerimiento Hídrico en los cultivos

Utilizando la ecuación de Penman – Monteith, se determinó que las pérdidas de agua a la atmosfera de los cultivos hidropónicos corresponden a 0,22 [L/unidad] y 0,27 [L/unidad] para los tomates y lechugas, respectivamente. La ecuación se describe de la siguiente manera:

$$ET_c = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)\right) \cdot \lambda} \cdot K_c \quad (5)$$

En donde la evo-transpiración del cultivo ( $ET_c$ ) depende de un coeficiente del cultivo ( $K_c$ ), distinto para lechugas y tomates,  $R_n$  el cual corresponde a la radiación neta al que se ve expuesto el cultivo,  $G$  es el flujo de calor hacia el suelo,  $(e_s - e_a)$  es el déficit de presión de vapor del aire,  $\rho_a$  es la densidad media del aire a presión constante,  $c_p$  el calor específico del aire,  $\Delta$  la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación,  $\gamma$  constante psicrométrica y  $r_s$  con  $r_a$  son la resistencia superficial y aerodinámica, respectivamente.<sup>[22][23]</sup>

Por lo que para evitar la deshidratación del cultivo es necesario otorgarle mayor cantidad de agua de la necesaria, concretamente utilizando los resultados de la Tabla 1 se obtiene:

$$Req. \text{híd.}_{Tom} = 0,51 \left[ \frac{\left(\frac{L}{\text{unidad}}\right)}{\text{mes}} \right] \cdot 1 \left[ \frac{kg}{L} \right] + 0,22 \left[ \frac{\left(\frac{L}{\text{unidad}}\right)}{\text{mes}} \right] \cdot 0,96 \left[ \frac{kg}{L} \right] = 0,72 \left[ \frac{\left(\frac{kg}{\text{unidad}}\right)}{\text{mes}} \right]$$

$$Req. \text{híd.}_{Lec} = 1,09 \left[ \frac{\left(\frac{L}{\text{unidad}}\right)}{\text{mes}} \right] \cdot 1 \left[ \frac{kg}{L} \right] + 0,27 \left[ \frac{\left(\frac{L}{\text{unidad}}\right)}{\text{mes}} \right] \cdot 0,96 \left[ \frac{kg}{L} \right] = 1,34 \left[ \frac{\left(\frac{kg}{\text{unidad}}\right)}{\text{mes}} \right]$$

En donde se utilizaron los valores de densidad de agua líquida y vapor de agua para obtener la masa de agua requerida.<sup>[24]</sup>

#### 4.4. Estimación de tamaño de cultivo

Se estimó arbitrariamente que el consumo por habitante al mes de tomates y lechugas corresponde a 27 y 3, respectivamente (Ver Anexo 8.3). Para un pueblo como Carrizalillo con aproximadamente 200 personas esto se traduciría en 1.350 unidades de tomates y 150 de lechuga a la semana, esto considerando un mes de cuatro semanas (Ver Anexo 8.6).

El periodo de cultivo de tomates corresponde a 21 semanas y el de lechuga a 10, por lo que para tener una oferta constante se realizaran ciclos de producción, es decir, se tendrán 21 puestos de elaboración de tomates y 10 de lechugas.

Utilizando los datos presentados anteriormente y el rendimiento de cultivo de la Tabla 1, se obtiene el área de cultivo necesaria para los tomates de aproximadamente 224 [ $m^2$ ] y 84 [ $m^2$ ] para las lechugas. Lo que se traduce en un total de 28.448 tomates y 1.512 lechugas. Además, se obtuvo la cantidad total de agua requerida por los cultivos al mes: 20.767 [L] para los tomates y 2.057 [L] para las lechugas (Ver Anexo 8.6), es decir un total de 0,76 [ $m^3/día$ ].

#### 4.5. Diseño de planta desaladora de agua

El diseño de la planta desaladora que se tendrá en el proyecto fue propuesto por el memorista a partir del utilizado por la empresa Aguas Antofagasta S.A. El modelo consta de tres etapas principales: Captación, Filtración y Desalinización. Cada una trabaja con un sistema de separación para eliminar distintos tipos de sólidos disueltos. En el diagrama de la Figura 6 se puede observar el resultado propuesto.<sup>[25]</sup>

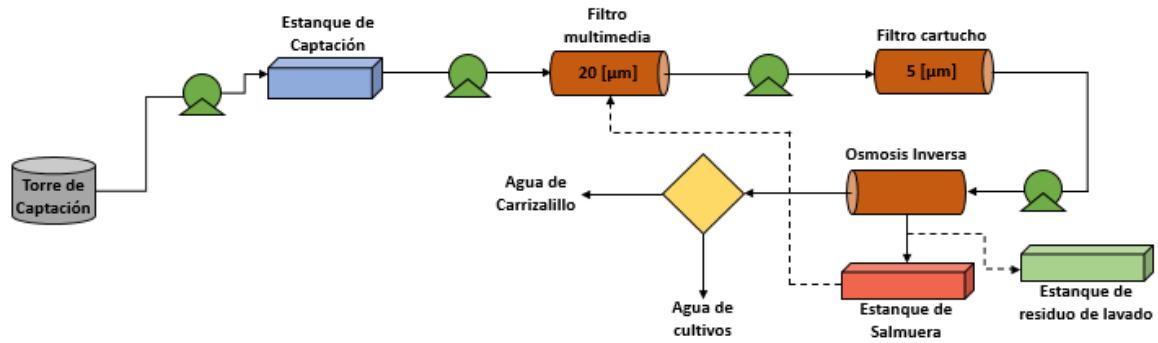


Figura 6. Diagrama de diseño de planta desalinizadora.

A modo de explicación, la etapa de Captación se lleva a cabo mar adentro, en donde bombas se encargan de llevar el agua a la planta a través de tuberías. La torre de captación se ubicaría en el fondo del mar a una distancia aproximada de 400 metros de la costa, esta distancia está sujeta al plano legal de jurisdicción marítima en Chile y a 25 de profundidad, valor aproximado considerando la geografía marítima de la zona según los pescadores del sector. En esta zona el agua es extraída a partir de bombas hasta llegar a la planta, en donde se guarda en estanques de captación. Seguido, se somete a una serie de filtros, los cuales corresponden a un pretratamiento necesario para la etapa de osmosis inversa. Una vez desalinizada el agua esta puede ser destinada a los cultivos y a la población de Carrizalillo. Cabe destacar que la salmuera puede ser utilizada como solución de limpieza del filtro multimedia y el estanque de residuo de lavado podría usarse para la misma función en otros equipos. Considerando que en temporada alta el consumo diario corresponde a  $68 [m^3]$ , la planta será diseñada para una producción de  $70 [m^3/día]$  pudiendo así abastecer también a los cultivos.

#### 4.6. Estudio económico del caso base

A partir del caso base mencionado en las secciones 4.4 y 4.5, se establece un modelo económico que contempla la producción de agua potable y cultivos requeridos para 200 personas. Se considera el consumo de agua y alimentos obtenidos a través de la encuesta realizada, luego se realiza la estimación de costos para ese nivel de producción considerando que el 100% de la energía eléctrica requerida será proporcionada a través de paneles solares (Los detalles son explicados en los Anexos 8.8 y 8.9). Como principal resultado de esta sección, se entrega el flujo de caja del proyecto, considerando los costos de inversión, los costos operacionales y los ingresos estimados del caso base. En el Gráfico 1se puede apreciar la información previamente mencionada:



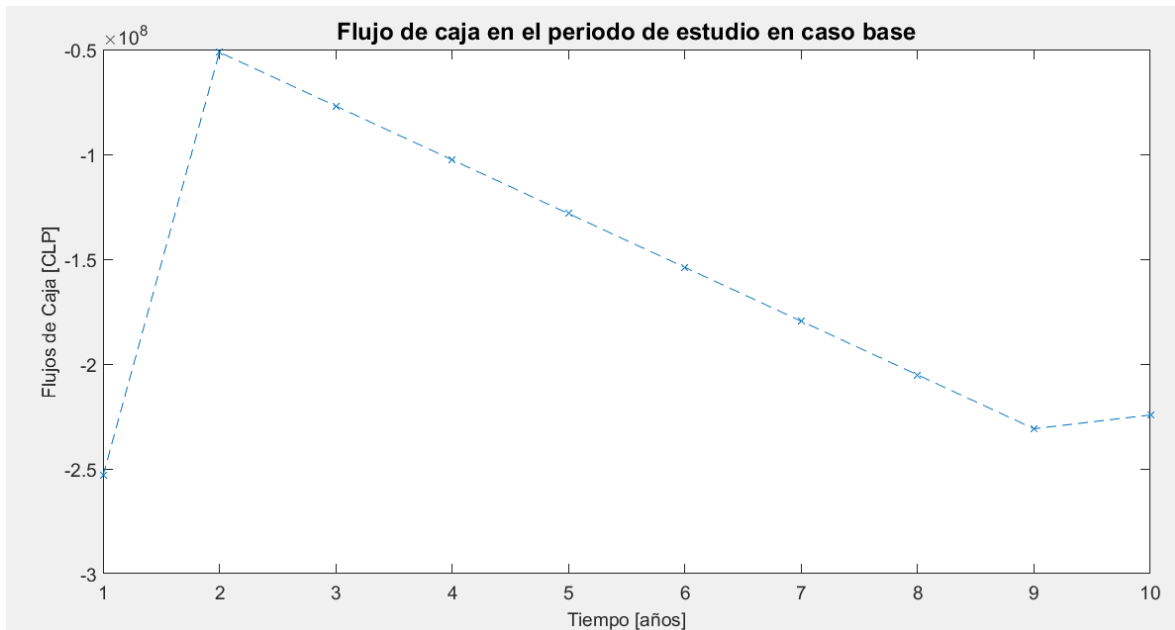


Gráfico 1. Flujos de caja para valores del caso base.

Como se puede observar en el Gráfico 1, las condiciones no hacen rentable económicamente al proyecto, es más, para el tiempo de estudio no se obtienen valores positivos en el eje vertical. El escenario estudiado presenta un valor presente neto (VPN) de  $-1,03 \cdot 10^9$ , un resultado nada atractivo para la inversión. En este caso, no existe una tasa interna de retorno (TIR) puesto que no existe un cambio de signo en el VPN según el Gráfico 1. Es por esto que se hace necesario cambiar el caso base, buscando un óptimo en los distintos parámetros del problema que permita obtener un proyecto económicamente factible.

#### 4.7. Optimización de parámetros

A partir del resultado anterior, se procedió a realizar un estudio de sensibilidad de variables en el modelo. Las condiciones más significativas corresponden al precio de venta de los cultivos y la cantidad de estos que se venden, es decir, los tomates y las lechugas corresponden al factor que permite que el proyecto sea económicamente rentable.

Utilizando la herramienta computacional MATLAB se lleva a cabo la elaboración del modelo económico. Como principales variables del sistema se utilizan: los precios de venta de tomate y lechuga, los cuales al aumentar hacen más rentables el proyecto y el público de consumidores de estos productos, aumentando así los ingresos. Es por lo anterior que se hace atractiva la idea de contar con la población de Chañaral de Aceituno y Caleta Carrizalillo para tener una mayor venta de tomates y lechugas. Se utilizará una metodología de optimización, la cual permite encontrar las condiciones óptimas a partir de una adivinanza inicial. El modelo estudia diversos escenarios, probando una gama de valores con el fin de obtener flujos de cajas positivos, limitando las variables con condiciones otorgadas.

La optimización se lleva a cabo mediante la búsqueda de un mínimo para una función, la cual es definida mediante variables de interés en el modelo. A continuación, se muestra la ecuación utilizada:

$$F(x) = A_1 \cdot (P_T - 120)^2 + A_2 \cdot (P_L - 500)^2 + \frac{A_3}{U} + A_4 \cdot t_{ret} + A_5 \cdot (N_T - 500)^2 + A_6 \cdot (N_L - 500)^2 \quad (6)$$

La función anterior trabaja con diferencias cuadradas, restando el valor probable de la variable con su adivinanza inicial, es este caso las cantidades iniciales con las que se trabaja son: 120 [CLP/tomate] precio de venta de tomates ( $P_T$ ), 500 [CLP/lechuga] el precio de venta de lechuga ( $P_L$ ), valores obtenidos a partir de los precios de la vega central (Ver Anexo 8.8.1). También se utilizará como población objetivo de 500 [habitantes] como consumidores de cultivo ( $N_T$  y  $N_L$ ). Recordando que existe un número de 200 personas aproximadamente en cada localidad, no existe una sobreestimación de este valor. Las variables descritas se mueven entre las siguientes cotas:

Tabla 2. Cotas para valores de variables a optimizar.

| Variable            | Valor Inferior | Valor Superior |
|---------------------|----------------|----------------|
| $P_T$ [CLP/tomate]  | 60             | 180            |
| $P_L$ [CLP/lechuga] | 250            | 750            |
| $N_T$ [hab]         | 250            | 750            |
| $N_L$ [hab]         | 250            | 750            |

Otras variables que se consideran corresponden a la utilidad económica ( $U$ ), la cual es calculada con el modelo económico utilizado en la sección 4.6 y el tiempo de retorno ( $t_{ret}$ ) el cuál se obtiene en el año en que  $U$  deja de tener valores negativos. También se utilizan parámetros constantes  $A_i$ , los cuales fueron ajustados para los valores de cada variable. A continuación, se muestran los valores de cada uno:

Tabla 3. Valores de parámetros de función optimizadora.

| Parámetro                        | Valor              |
|----------------------------------|--------------------|
| $A_1$ [tomate/CLP] <sup>2</sup>  | 10                 |
| $A_2$ [lechuga/CLP] <sup>2</sup> | 50                 |
| $A_3$ [CLP]                      | $10 \cdot 10^{12}$ |
| $A_4$ [1/año]                    | 100                |
| $A_5$ [1/hab] <sup>2</sup>       | 8                  |
| $A_6$ [1/hab] <sup>2</sup>       | 1                  |

Los datos anteriormente mencionados corresponden a la adivinanza inicial previamente mencionada, la cual variará de acuerdo a minimizar los costos para los pobladores, evitando el lucro en la zona, pero buscando la rentabilidad económica del proyecto.

En el Gráfico 2 se muestra los flujos de cajas para un horizonte de 10 años:

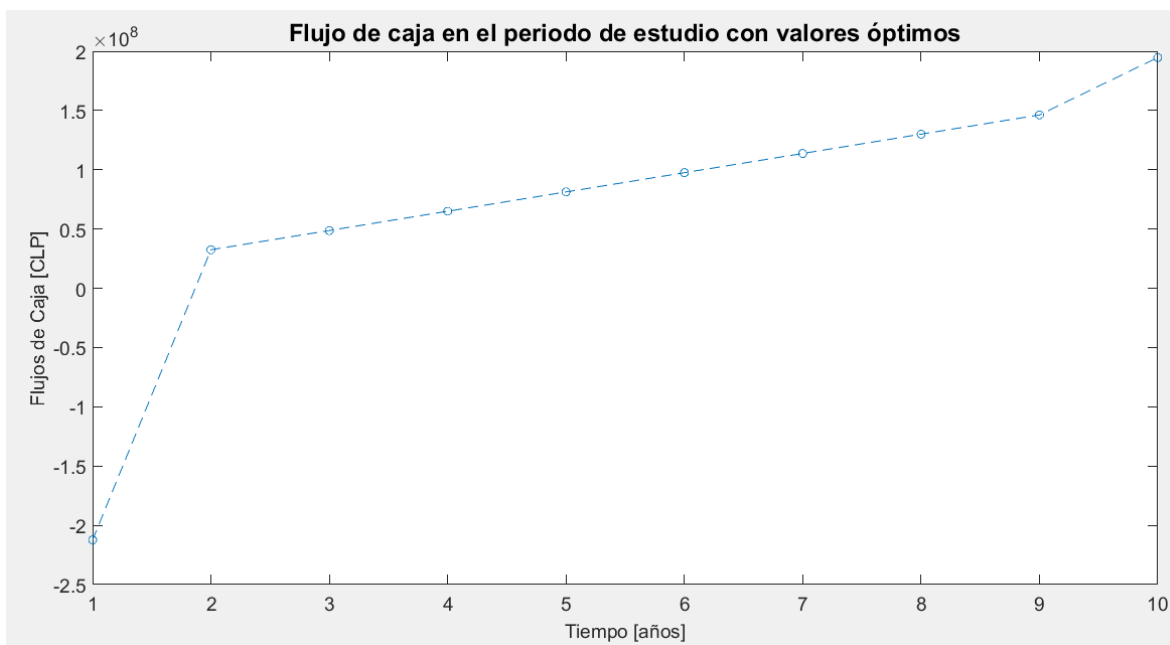


Gráfico 2. Flujos de caja para valores optimizados por MATLAB.

Del Gráfico 2, se aprecia que los flujos de caja comienzan a ser positivos antes de cumplir el segundo año del proyecto. El presente escenario entrega un VPN de  $3,29 \cdot 10^8$  y una TIR de 31% para una tasa de descuento del 8%, es decir, el modelo presenta una flexibilidad de 23%.<sup>[26]</sup>

En cuanto a los valores que fueron optimizados, en la Tabla 4 se muestra el ajuste realizado por el programa:

Tabla 4. Valores óptimos de las variables de estudios obtenidos.

| Nombre de la variable               | Estimación inicial de la variable | Valor óptimo de la variable |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Precio de venta tomate [CLP]        | 120                               | 180                         |
| Precio de venta lechuga [CLP]       | 500                               | 602                         |
| Público objetivo para tomate [hab]  | 500                               | 600                         |
| Público objetivo para lechuga [hab] | 500                               | 300                         |

Este aumento en la población objetivo significaría un aumento en el área de cultivo, en el presente escenario es necesario tener una producción semanal de 4.050 tomates y 225 lechugas. Utilizando el rendimiento de cultivo enseñado en la Tabla 1 y recordando los puestos de elaboración para cada cultivo, las nuevas áreas requeridas son de 670 [m<sup>2</sup>] para tomates y 125 [m<sup>2</sup>] para lechugas, lo que produce un aumento en el costo capital no considerable puesto a la sobreestimación de costos realizada en el Anexo 8.8.2. En cuanto a la demanda hídrica, las nuevas condiciones presentan un requerimiento de agua diario de 2,07 [m<sup>3</sup>] para tomates y 0,1 [m<sup>3</sup>].

#### 4.7.1. Escenario considerando un préstamo bancario

Como último escenario de estudio se evaluó la posibilidad de cubrir los costos de inversiones para la planta de desalinización y los cultivos hidropónicos, dichos valores son cercanos a

40.000.000 [CLP] (Ver Anexos 8.8.2 y 8.8.4), por lo que se procede a hacer la evaluación económica con el pago de una amortización. El Gráfico 3 muestra el resultado para este caso:

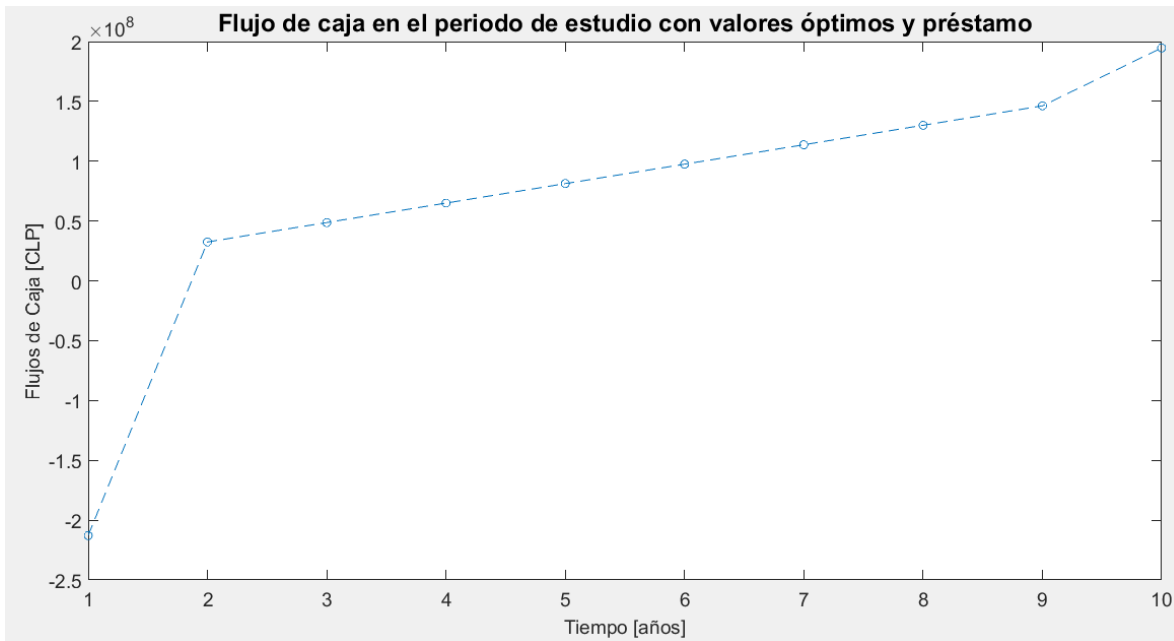


Gráfico 3. Flujos de caja para valores optimizados con préstamo por MATLAB.

Se aprecia en el Gráfico 3 un comportamiento similar al observado en el Gráfico 2, sin embargo, se pueden observar diferencias en los parámetros económicos. El VPN en este escenario es de  $3,28 \cdot 10^8$ , un poco menor al obtenido anteriormente y una TIR de 0,31% al igual que el caso anterior. Cabe destacar que la inversión realizada por los paneles solares es cercana a los 200.000.000 [CLP], por lo que recibir un préstamo para los otros costos capitales resulta insignificante para el escenario total.

#### 4.8. Estudio de sensibilidad de variables

En adición al análisis anterior, se decidió estudiar el cambio en torno al valor óptimo de las variables anteriormente mencionadas, esto para observar el comportamiento a posibles variaciones en los escenarios durante la puesta en marcha. Específicamente, se realiza un barrido desde el 50% hasta un 150% de magnitud en la variable. Además, se añade al estudio otros factores propensos a cambiar su valor en la práctica, como son: los precios de los fertilizantes que aportan nitrógeno, fósforo y potasio a los cultivos, el precio de venta del agua para la población y el porcentaje de la demanda energética que debe ser abordada por el proyecto, con el fin de conocer si podría ser mejor contar con menor cantidad de paneles solares. En el Gráfico 4 se muestran los resultados para este caso:

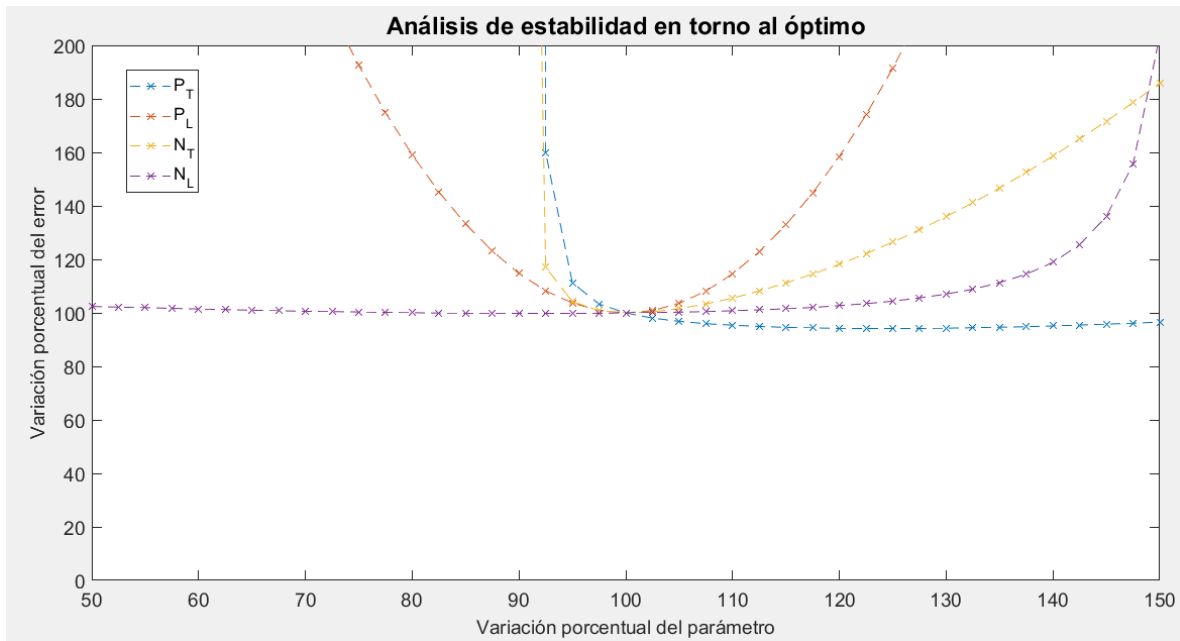


Gráfico 4. Estudio de estabilidad de variables respecto al óptimo.

En el Gráfico 4 se puede observar que para valores menores al obtenido de precio de venta de tomates ( $P_T$ ) y población objetivo para la venta de este ( $N_T$ ) se genera una asintota vertical, por lo que estos valores no son factibles. Cabe destacar que óptimo para  $P_T$  se encuentra cercano al 120%, por lo que este precio podría aumentar desde 180 [CLP] (Ver Tabla 4) hasta 216 [CLP]. Respecto al precio de la lechuga ( $P_L$ ) se puede decir que el valor encontrado corresponde al óptimo por la forma de la parábola. Finalmente, la población objetivo para la venta de lechuga ( $N_L$ ) tiene una tolerancia bastante significativa para las variaciones porcentuales.

Antes de proceder se hace necesario enseñar los valores de las variables que son añadidas al estudio, en la Tabla 5 se resume dicha información:

Tabla 5. Valores iniciales de las variables de estudios.

| Nombre de la variable  | Estimación inicial de la variable |
|--|-----------------------------------|
| Precio de venta agua [CLP]   | 2.000                             |
| Precio de venta fertilizante N [CLP/kg]                            | 1.811                             |
| Precio de venta fertilizante P [CLP/kg]                            | 6.500                             |
| Precio de venta fertilizante K [CLP/kg]                            | 5.062                             |
| Porcentaje de demanda eléctrica abastecido por paneles solares [%] | 100%                              |

Estos valores son añadidos al estudio para observar el comportamiento que tendría el escenario del proyecto frente a cambios en estos factores. En el Gráfico 5 se resumen los resultados.:

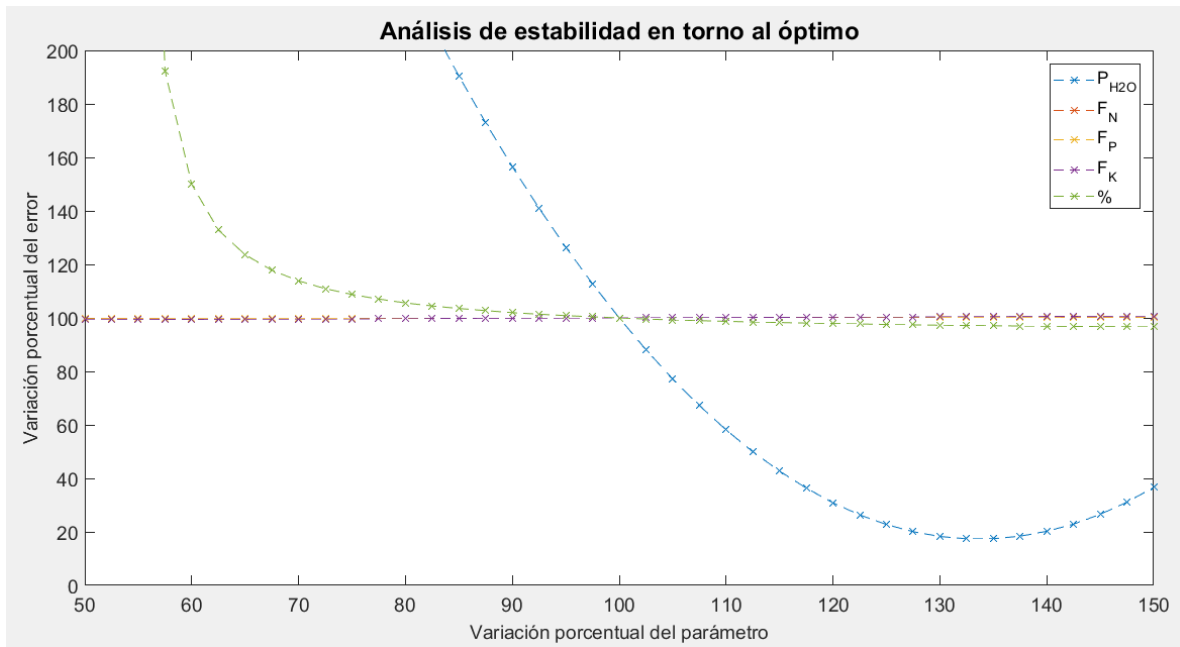


Gráfico 5. Comportamiento de variables respecto a su valor inicial.

En el Gráfico 5 se puede observar que el escenario estudiado presenta una tolerancia total para los precios de los fertilizantes ( $F_N$ ,  $F_P$  y  $F_K$ ) de manera tal que se mantienen horizontales en todo el tramo de estudio. Respecto al precio de venta del agua ( $P_{H_2O}$ ) se puede decir que el escenario óptimo correspondería a un aumento de este valor cercano al 30%, ósea, 2.600 [CLP]. Finalmente, el porcentaje de la demanda eléctrica de la planta cubierta con paneles solares (%) no acepta valores menores al 100%, ya que se alejan del óptimo, aun así, se puede considerar la generación de energía (valores mayores al 100%) y su venta, pero no produce grandes beneficios.

#### 4.9. Estudio de planos reguladores

Para la elaboración del proyecto se hace necesario contar con un terreno que cumpla todos los parámetros legales que permitan la construcción en la zona. La herramienta utilizada para el estudio corresponde a los planos reguladores de la región, el cual puede ser visto por la línea de Infraestructura de Datos Especiales (IDE) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). La Imagen 4 muestra el terreno estudiado y la posible localización de la planta desalinizadora:

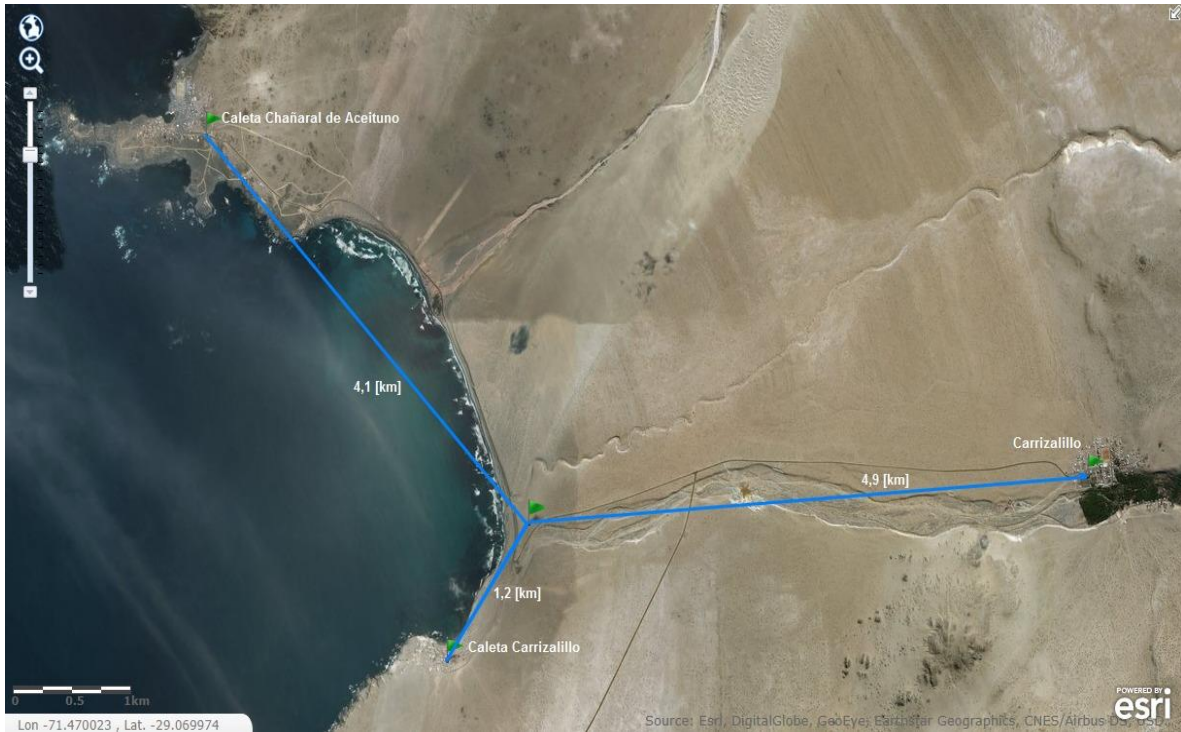


Imagen 4. Distribución espacial de las localidades con respecto a la localización probable de la planta. [27]

En la Imagen 4 se puede observar las distancias entre Caleta Carrizalillo, Caleta Chañaral de Aceituno y Carrizalillo con un punto central ubicado a las cercanías costeras. El largo de cada tramo corresponde a 1,2 [km], 4,1 [km] y 4,9 [km] respectivamente. Cabe destacar que las tres localidades están conectadas por un camino pavimentado, el cual facilita la distribución de los productos obtenidos por cultivos hidropónicos.

La distribución de planos reguladores de la zona muestra dos grandes áreas, las cuales son destinadas a desarrollo turístico y apoyo de centros poblados. En la Imagen 5 se puede observar la distribución espacial de dichas superficies:

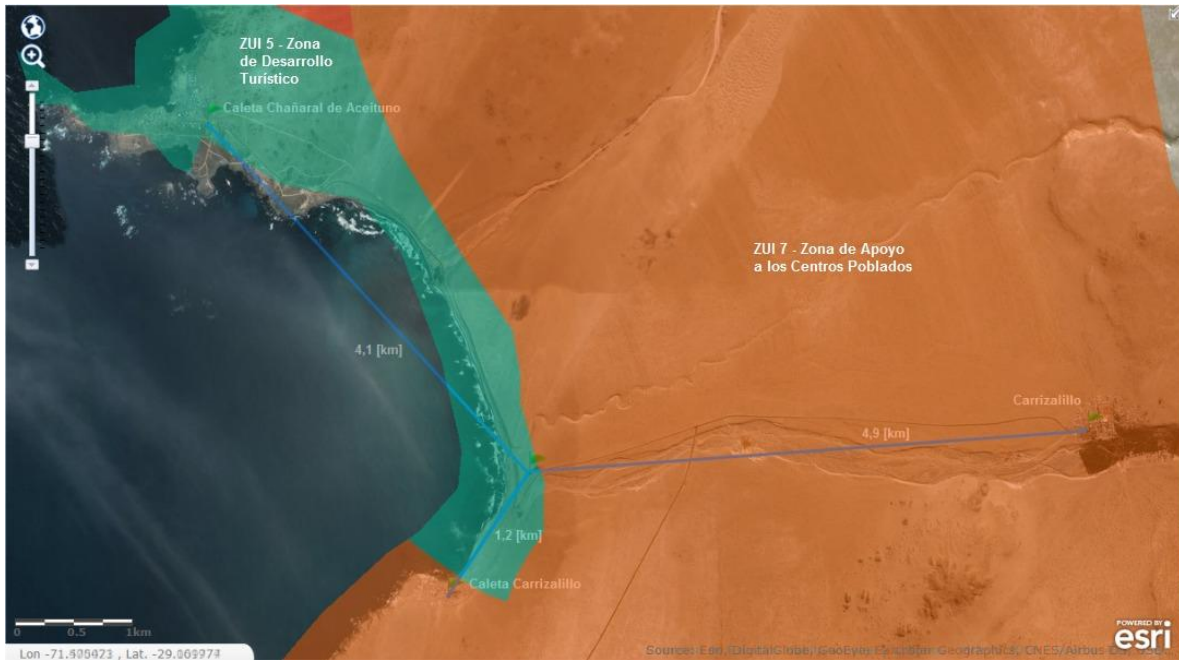


Imagen 5. Planes reguladores de la zona estudiada. [27]

Respecto al área ZUI – 5, su uso está destinado sólo a equipamiento, áreas verdes y vivienda. Por lo que esta zona no permite la construcción de la planta de desalinización. El área ZUI – 7, por otra parte, admite actividades productivas. [27]

*“Según el artículo 35 de la zona ZUI – 7, estos terrenos se destinan a futuras extensiones que involucren infraestructura complementaria para el desarrollo urbano, necesarias para la producción de energía y proyectos de saneamiento ambiental. Instalaciones extractivas, industriales o de equipamiento que, por razones de la localización del recurso, requieran obligatoriamente ubicarse en esa área “. [28]*

Debido a la definición anterior, el proyecto podría construirse en la zona mencionada.

#### 4.10. Resultados de la Herramienta de Análisis Integral (HAIN)

El desarrollo de este análisis se enseña en la sección 8.10, en donde se da cuenta de las preocupaciones principales que se deben tener al momento de realizar el proyecto. El punto de mayor énfasis corresponde al correcto uso o eliminación que se le debe dar a la salmuera, puesto que eliminarla en un punto sin su previa dilución resultaría perjudicial para la vida marina de la zona.

La elaboración de la planta de desalinización traería beneficios para el sector. Los habitantes de Carrizalillo serían los principales favorecidos debido al aporte hídrico, luego los pobladores de Caleta Chañaral de Aceituno debido a que la actual fuente de agua potable podría centrarse completamente en otorgarle un mejor servicio a ellos.

El proyecto no hace diferencias sociales para los habitantes de las tres localidades en lo que a cultivo se refiere, puesto que se tendrá una distribución para todos sin diferencia de precios. Sin embargo, se realiza distinción en la distribución de agua potable puesto que esta sería producida sólo para



Carrizalillo, aunque no se descarta una posible ampliación a futuro debido a la rentabilidad obtenida en la evaluación económica.

Finalmente, el proyecto a pesar de traer beneficios que podrían ser considerados sociales, se forja desde una toma de decisiones que busca la factibilidad del mismo, por lo que no podría decirse que el enfoque es social.

## 5. Discusiones

Respecto a la comparación de métodos de cultivos, se debe tener presente que en la bibliografía utilizada se estudiaban casos favorables para los cultivos convencionales en tierra, estos involucraban un sistema de riego por goteo, técnica que reduce el gasto innecesario de agua. Por otro lado, los casos estudiados por hidroponía no consideraban recirculación de solución nutritiva, es decir, existe un excedente de fertilizante y agua en estos escenarios. Aun así, el método hidropónico es más conveniente que el cultivo tradicional.

Mediante el cálculo de la pérdida de agua por evo-transpiración se utilizaron distintos supuestos en el desarrollo de la ecuación de Penmann-Monteith, valores recomendados por bibliografía que no necesariamente se cumplen en el ambiente costero de la región de Atacama. Parámetros como la velocidad del viento promedio en la zona, humedad relativa del ambiente, entre otros, es probable que el valor obtenido de flujo de agua perdida sea distinto, sin embargo, se realizó una variación para distintos casos, determinado que los cambios del flujo no son significativos.

La estimación de área es realizada mediante el rendimiento de los cultivos, valores obtenidos por bibliografía en casos reales, por lo que se considera acertada esta estimación. Sin embargo, el cálculo que se obtiene a partir del consumo semanal de lechugas y tomates semanales por la población chilena puede presentar variaciones, debido a que proporcionar alimentos de manera local, podría aumentar el consumo de estos en la zona.

El diseño de la planta está basado en una planta real, por lo que técnicamente comprende todas las etapas requeridas para el proceso de desalinización. Sin embargo, existe la posibilidad que para el tamaño de producción del proyecto existan alternativas más eficientes en cuanto a elección de equipos. Cabe destacar que los cálculos realizados para tuberías consideraron condiciones ideales, lo que generaría errores en la longitud de cañerías y alturas de elevación de bombas.

El análisis económico enseñado corresponde a un resultado de mayor error de estimativo, lo anterior se debe a que las empresas productoras de equipos entregaron cotizaciones gruesas debido al contexto académico del estudio. El costo capital de algunas bombas fue obtenido a partir de estimaciones utilizadas en bibliografía. Además, los precios fijados para la conversión de monedas internacionales están sobrestimados para amortiguar la función de costos. Respecto a los sueldos de los trabajadores, se realizó una estimación arbitraria respecto a trabajos similares. Finalmente, se considera altamente probable que algunos insumos sean más baratos al ser comprados al por mayor y comprados mediante tiendas que no sean de retail como Easy o Homecenter Sodimac.

Respecto a la búsqueda de variables óptimas, se puede decir que los resultados obtenidos mejoraron la rentabilidad económica del proyecto. Sin embargo, para el estudio realizado se consideraron sólo algunas variables en el sistema, por lo que esta estimación no es completamente cercana a la realidad. El estudio de sensibilidad de parámetros determina que el valor que presenta un mayor cambio respecto a la adivinanza inicial corresponde a la población objetivo para la venta de tomates y lechugas, esto lo convierte en un factor determinante para la factibilidad económica del proyecto, destacando que el valor encontrado cumple con la cantidad total de habitantes de la zona. En cuanto a los indicadores económicos, se determina a partir del VPN que el escenario óptimo puede permitir que la elaboración de la planta desalinizadora con cultivos hidropónicos sea viable en cuanto a costos, obteniendo la recuperación total de la inversión en un periodo menor a dos

años, lo que podría significar una ampliación del proyecto pasado este punto. Por otro lado, la TIR calculada da cuenta de la flexibilidad en el proyecto, manteniendo la rentabilidad de este frente a variaciones menores al 20%. Finalmente, el escenario que contempla un préstamo bancario que cubre los costos capitales no muestra un cambio significativo, esto debido a que la inversión mayor corresponde a la compra de los paneles solares, la cual no fue considerada en el préstamo, convirtiendo este gasto en el de mayor impacto para la elaboración del proyecto.

El estudio de estabilidad en torno al óptimo calculado muestra que la mayoría de las variables presentan una alta flexibilidad respecto al escenario obtenido. La variable que presenta mayor variabilidad corresponde a  $P_{H2O}$ , la cual si aumentara haría el proyecto aún más factible, sin embargo, el objetivo del proyecto no permite el costo elevado de este producto. También se destaca que el porcentaje de la demanda abastecida por paneles solares no perjudica al proyecto, por lo que se podría llegar a considerar un número de paneles solares mayor al necesario, con el fin de generar energía eléctrica en la localidad.

Los planos reguladores confirman la posible elaboración del proyecto en una locación a una distancia entremedio de las tres localidades. La zona estudiada permite construcción de infraestructura complementaria al desarrollo urbano, como lo es una planta de desalinización de agua de mar. Además, el lugar de construcción permite una mejor distribución de los cultivos, al estar conectado con la carretera que conecta los poblados involucrados en el estudio.

Finalmente, la herramienta HAIN da cuenta de la preocupación que se debe dar a la salmuera, la cual corresponde al principal desecho de la desalinización de agua de mar. Las posibles soluciones que se le pueden dar a esta corresponde a: Limpieza de filtro por tecnología DOHS y retrolavado, dilución de esta a través de distintos canales de eliminación y utilización de agua con contenido salino para el cultivo de aceitunas de la zona. El último uso fue propuesto por uno de los habitantes de Carrizalillo, el cual indica que las aceitunas expuestas a estas condiciones son mejores que otras que no. Otro punto a destacar del análisis corresponde a la falta de riquezas sociales que este aporta, principalmente porque los beneficios otorgados por el proyecto nacen desde una justificación de factibilidad. Se propone a futuro una ampliación en la producción de agua potable para otorgar de manera equitativa el beneficio a todos los grupos sociales de la zona. Además, la rentabilidad del proyecto permitiría la generación de energía eléctrica con la compra de más paneles solares de los necesarios, lo que iría directamente a los habitantes, que actualmente tienen problemas por cortes de electricidad.

## 6. Conclusión

A partir de la bibliografía se concluye que el método de cultivo por hidroponía es más eficiente en cuanto a requerimiento nutricional e hídrico en comparación a la plantación en tierra, lo cual es consistente con lo esperado.

Podría realizarse un ajuste en los valores utilizados en la ecuación de Penmann-Monteith para obtener un flujo de pérdida por evo-transpiración más certero en los cálculos. Sin embargo, cualquier variación no tiene un impacto significativo.

El ajuste de producción semanal de tomates y lechugas puede ser realizado en la puesta en marcha del proyecto. Sin embargo, la sobrestimación de área de cultivo entrega cierta libertad al proyecto en caso de necesitar más productos en el futuro.

El diseño de la planta está hecho con equipos que permiten aumentar la capacidad de producción debido a que están sobrestimados. De ser así, habría que realizar un ajuste en el dimensionamiento de tuberías, debido a que el sistema considerado es ideal y no considera pérdidas de carga por singularidades ni roce.

Se concluye que el proyecto no sería económicamente factible con las condiciones iniciales. Por lo que se hace necesario buscar un escenario óptimo para su ejecución.

A partir de la búsqueda de valores óptimos, se obtienen condiciones para las cuales el proyecto presenta un VPN de 25.000.000 [CLP] y una TIR de 31%. Estas condiciones involucran, por sobre todo el aumento del público objetivo en la venta cultivos, requiriendo un número de clientes menor al total de las tres localidades. También se estudió un escenario que involucraba un préstamo bancario correspondiente al costo capital de la inversión de la planta de desalinización y los cultivos, este no tiene mayor influencia puesto que el gasto de paneles solares corresponde a un precio más alto, haciendo de este, el factor más significativo en cuanto a adquisición.

Respecto al análisis de estabilidad, se observa que la mayoría de las variables poseen alta flexibilidad. La única que tiene un efecto distinto corresponde al precio de venta de agua, el cual aumentando su valor puede incrementar la utilidad del proyecto, sin embargo, los propósitos actuales del mismo no lo permiten.

El estudio de planos reguladores entrega una posible área de construcción ubicada en un sector intermedio a las tres localidades, ubicada en las cercanías del mar y conectada a las tres comunidades por una misma carretera.

Finalmente, la HAIN indica que la principal preocupación debe ser el correcto uso de la salmuera como principal desecho del proceso, la cual podría utilizarse en la limpieza de filtros o en los cultivos de aceitunas en la zona, en caso de ser devuelta al mar debe hacerse mediante distintos canales para su dilución. También se plantea que a futuro el proyecto debe ampliarse para distribuir agua a las localidades restantes y podría contar con más paneles solares para aportar a la zona, esto le daría proporcionar una riqueza social a la idea, ya que actualmente no tiene.

## 7. Bibliografía

- [1] Ciudad del Cabo: el “día cero” en el que por primera vez una gran ciudad del mundo podría quedarse sin agua. BBC News. [En línea] <<https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-42742476>> [Consulta: 20 de marzo de 2018]
- [2] Escasez de agua afecta a 61 comunas del país. La Tercera. [En línea] <<http://www.latercera.com/tendencias/noticia/escasez-agua-afecta-61-comunas-del-pais/54429/#>> [Consulta: 20 de marzo de 2018].
- [3] Decretan zona de escasez hídrica a Freirina, Vallenar y Huasco. Radio Profeta. [En línea] <<http://www.radioprofeta.cl/decretan-zona-de-escasez-hidrica-a-freirina-vallenar-y-huasco/>> [Consulta: 20 de marzo de 2018].
- [4] Carrizalillo. Atacama Virtual. [En línea] <<https://www.geovirtual2.cl/MVpaisaje3/tur290Carrizalillo01.htm>> [Consulta 27 de mayo de 2019]
- [5] Distillation vs. Membrane filtration: overview of process evolutions in seawater desalination. Bart Van der Bruggen, Carlo Vandecasteele. Elsevier. Desalination 143 (2002), 207-218.
- [6] Presentación Operacional Planda Desaladora Norte. Departamento de Desalación. Aguas Antofagasta
- [7] Cómo tener Cultivos Hidropónicos. TvAgro por Juan Gonzalo Angel. [En línea] <[https://www.youtube.com/watch?v=fEgTn-BJ\\_zc](https://www.youtube.com/watch?v=fEgTn-BJ_zc)> [Consulta: 11 de diciembre 2017]
- [8] Diseño de sistema de generación fotovoltaica para viviendas conectadas a la red de distribución, en el contexto de la ley N° 20.571. Millaray Miranda Escobar. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile. 2016.
- [9] Valor presente neto, EUSTON. [En línea] <<https://www.euston96.com/valor-presente-neto/>> [Consulta: 17 de mayo 2019]
- [10] Tasa Interna de Retorno (TIR): definición, cálculo y ejemplos. Rankia. [En línea] <<https://www.rankia.cl/blog/mejores-opiniones-chile/3391122-tasa-interna-retorno-tir-definicion-calculo-ejemplos>> [Consulta: 17 de mayo 2019]
- [11] Biofilms bacterianos: ¿Por qué deberían importarnos?. Centre de Recerca en Sanitat Animal. [En línea] <<http://www.cresa.cat/blogs/sociedad/es/espanol-biofilms-bacterianos-por-que-deberia-importarnos/>> [Consulta: 19 de febrero 2019]
- [12] Quienes Somos. IDE Technologies. [En línea] <[https://www.ide-tech.com/es/ide-sus-aliados-en-agua/?data=item\\_1](https://www.ide-tech.com/es/ide-sus-aliados-en-agua/?data=item_1)> [Consulta: 28 de mayo de 2019]
- [13] Three methods of forwards osmosis cleaing for RO membranas. Boris Liberman. Membrane Techonology – IDE Techonologies Ltd, Israel. Elsevier. Desalination 431. 2018. pp 22 – 26.
- [14] MODELAMIENTO SISTEMA PRODUCCIÓN AP GRAN SISTEMA NORTE FASE 2: Información de obras especiales y singulares. Estudio de vidas útiles de equipos. Planta de tratamiento de agua potable de osmosis inversa. Aguas Antofagasta.
- [15] Manual de mantenimiento, Planta solar fotovoltaica de 500kW sobre la cubierta de una nave industrial en la ciudad de Sevilla. Manuel Campos Fernández. Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyecto de Ingeniería. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. Abril. 2012.
- [16] Plan Regulador Comunal. Observatorio Santiago. [En línea] <<http://www.observatoriosantiago.cl/?p=81>> [Consulta: 4 de diciembre 2018]

- [17] Dilemas Éticos de la Ingeniería Química. Richard Martínez Caro. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile. 2012.
- [18] Requerimientos nutricionales de un cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero en la sabana de Bogotá. F. Calderón. Bogotá D.C., Colombia S.A. 2005.
- [19] Producción hidropónica de lechuga con y sin recirculación de solución nutritiva. J. Gutierrez. Departamento de fitotecnia, Instituto de horticultura. Chapingo, México. 2011.
- [20] Requerimientos de riego para tomate de invernadero. J. Flores, W. Ojeda-Bustamante, I. López, A. Rojano, I. Salazar. Terra Latinoamericana, vol. 25, núm. 2, 2007, pp. 127-134. Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo, A.C. Chapingo, México. 2007.
- [21] El metabolismo hídrico y los flujos de agua virtual. Una aplicación al sector hortofrutícola de Andalucía (España). C. Madrid, E. Velázquez. Revista Iberoamericana de Economía Ecológica Vol. 8: 29-47.
- [22] Coeficiente de cultivo. Open Course Ware. [En línea] <<http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/tema-8/COEFICIENTE-DE-CULTIVO.pdf>> [Consulta: 13 de abril 2018]
- [23] Evo-transpiración de cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Parte A: Evo-transpiración de referencia. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Estudio FAO riego y drenaje.
- [24] Densidades de algunas sustancias comunes a 1 atm (760 mm Hg). R. Pérez. [En línea] <[http://www.ehu.es/rperez/Fisicabio/docs/densidad\\_visco.pdf](http://www.ehu.es/rperez/Fisicabio/docs/densidad_visco.pdf)> [Consulta: 28 de marzo 2018]
- [25] Desaladora. Aguas Antofagasta S.A. [En línea] <<http://www3.aguasantofagasta.cl/desalacion.html>> [Consulta: 20 de marzo de 2018].
- [26] Evaluación Económica entre Osmosis Inversa (RO) y Desalinización Solar Térmica. Dietmar Brakemeier. GIZ. Santiago de Chile, 28 de abril, 2015.
- [27] Geoportal de Chile – Visor de Mapas. Planificación Territorial. Plan Regulador Intercomunal. Zonificación Plan Regulador Intercomunal Costero de Atacama. Geoportal. [En línea] <<http://www.geoportal.cl/visorgeoportal/>> [Consulta: 12 de marzo 2019]
- [28] ZUI – 7 Zona de Apoyo a los Centros Poblados. Plataforma Caldera. [En línea] <<http://www.plataformacaldera.cl/territorio/590/w3-article-68633.html>> [Consulta: 12 de marzo 2019]
- [29] Sistema de riego para invernaderos hidropónicos basado en la evo-transpiración de cultivo. A. Rojas, A. Noriega, G. Herrera, R. Chaparro. Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática, Facultad de Ingeniería C. U. Av. Universidad Esq. Gabino Barreda s/n. Querétaro. 2003.
- [30] Cultivo de lechuga *Lactuca sativa*. María Inés González Arístegui.
- [31] Manual de cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Nodo Hortícola. Facultad de ciencias agronómicas, Universidad de Chile.
- [32] Humedad relativa: evolución diaria, Freirina. Agroclima. [En línea] <<http://www.agroclima.cl/InformesAgroclima/InformesAgroclimaticos.aspx?IdEst=496&Infor=20>> [Consulta: 14 de abril de 2018].
- [33] Duplex acero piezas mojadas 100 m<sup>3</sup>/h bomba de agua de mar sin motor. Alibaba. [En línea] <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/duplex-steel-wetted-parts-100-m3-h-sea-water-pump-without-motor-60535428467.html>> [Consulta: 21 de agosto de 2018].

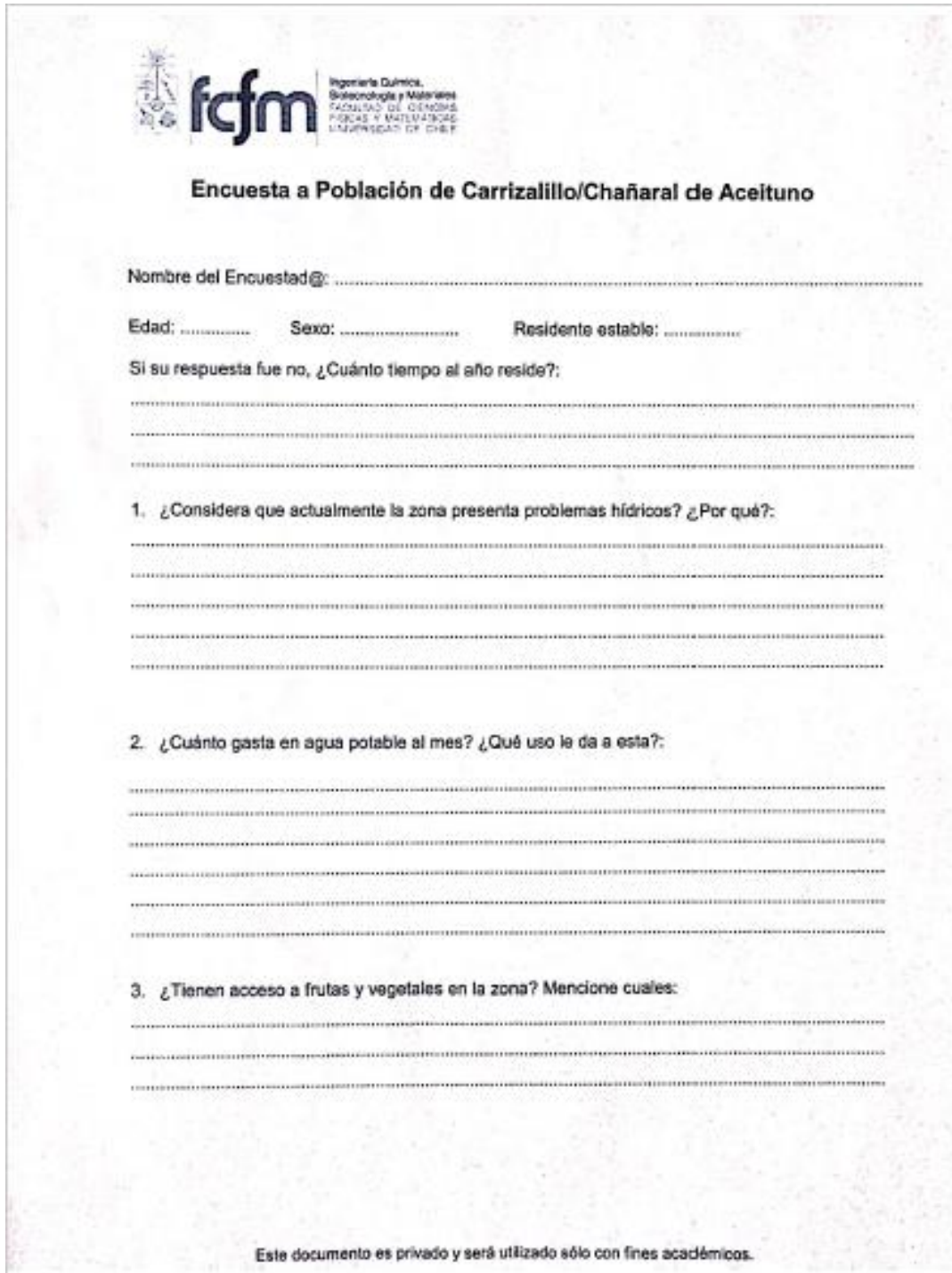
- [34] Aquatank Titan 35. Infraplast. [En línea] <<http://www.infraplast.cl/wp-content/uploads/2016/04/AQTT-35-120416.pdf>> [Consulta: 21 de agosto de 2018]
- [35] KSB Megachem. Manual técnico N°A2740.0S/5. Bomba de proceso para aplicación en Industrias Químicas y en General.
- [36] Osmosis Inversa. Culligan. CP042010 0105201 Catálogo.
- [37] Filmtec membranas SW30HR-320. Lenntech. [En línea] <<https://www.lenntech.com/products/Filmtec-Membranes/231995/SW30HR-320/index.html>> [Consulta: 21 de agosto de 2018]
- [38] Data Sheet 5CP Plunger Pump. Cat Pumps. [En línea] <[http://www.catpumps.com/products/pdfs/5CP6120.44101\\_C.pdf](http://www.catpumps.com/products/pdfs/5CP6120.44101_C.pdf)> [Consulta: 21 de agosto de 2018]
- [39] Tomate. Vega virtual. [En línea] <[http://www.vegavirtual.cl/?s=tomate&post\\_type=product](http://www.vegavirtual.cl/?s=tomate&post_type=product)> [Consulta: 14 de abril de 2018]
- [40] Jitomate de bola. Premier horticultura group. [En línea] <[http://www.premierhorticultura.com/exportacion\\_premier\\_horticultura\\_group.html](http://www.premierhorticultura.com/exportacion_premier_horticultura_group.html)> [Consulta: 14 de abril de 2018]
- [41] Lechuga hidropónica. Vega virtual. [En línea] <[http://www.vegavirtual.cl/?s=lechuga&post\\_type=product](http://www.vegavirtual.cl/?s=lechuga&post_type=product)> [Consulta: 14 de abril de 2018]
- [42] Evaluación técnica y económica de la producción de lechugas hidropónicas bajo invernadero en la Comuna de Calbuco, X Región. Rodrigo Córdova Wolff. Universidad austral de Chile, facultad de ciencias agrarias. Valdivia, Chile. 2005.
- [43] Precios de depósitos de agua. Jardinitis. [En línea] <<https://www.jardinitis.com/precios/depositos-agua>> [Consulta: 14 de abril de 2018]
- [44] Bidón doméstico 10 litros plástico Soga. Sodimac. [En línea] <<http://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/1611410/Bidon-domestico-10-litros/1611410>> [Consulta: 14 de abril de 2018]
- [45] 9mm 1.22x2.44 m Terciado estructural pino genérico. Sodimac. [En línea] <<http://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/650528/>> [Consulta: 14 de abril de 2018]
- [46] Cómo elegir un fertilizante nitrogenado adecuado. El mercurio. [En línea] <<http://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Redes/2014/01/02/Las-claves-para-elegir-un-fertilizante-nitrogenado-adecuado.aspx>> [Consulta: 14 de abril de 2018]
- [47] Fertilizante para plantas fosfato 1 kg bolsa Ergo. Sodimac. [En línea] <<http://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/881309/>> [Consulta: 14 de abril de 2018]
- [48] Potasio cloruro. Merck. [En línea] <[http://www.merckmillipore.com/CL/es/product/Potassium-chloride,MDA\\_CHEM-104936](http://www.merckmillipore.com/CL/es/product/Potassium-chloride,MDA_CHEM-104936)> [Consulta: 14 de abril de 2018]
- [49] Tienda melón. Melón. [En línea] <<https://tienda.melon.cl/>> [Consulta: 21 de agosto de 2018]
- [50] Lista de precios 2016-2017. Cosmoplas. Tuberías y Fittings. Tubería HDPE. Pp 190.
- [51] Tarifa de precios 2008, Sistemas de tuberías en PRFV. Amitech. Pp 13.
- [52] Filtros Multimedia. Inquinat. [En línea] <<http://www.inquinat.cl/productos-y-servicios/equipamiento/filtros-multimedia/>> [Consulta: 30 de agosto de 2018]
- [53] Perry. 1994. "Manual del Ingeniero Químico". Quinta Edición. Mc. Graw-Hill. México. Tomo5, sección 10.
- [54] Tubos PVC hidráulicos. Sodimac. [En línea] <<http://www.sodimac.cl/sodimac-cl/product/274097/Tuberia-hidraulica-con-goma-90-mm-6-m/274097>> [Consulta: 30 de agosto de 2018]


- [55] Tarifa de precios. Salvador Escoda S.A. B-2.
- [56] Estanque AquaTank 5000 litros. Sodimac. [En línea] <<https://www.easy.cl/es/easy-chile/ferreteria/gasfiteria/Flexibles-de-gas-y-accesorios/estanque-aquatank-5-000-litros-infraplast-1111818p>> [Consulta: 30 de enero de 2018]
- [57] Estanque abierto 500 litros. Sodimac. [En línea] <<https://www.easy.cl/es/easy-chile/ferreteria/gasfiteria/Flexibles-de-gas-y-accesorios/estanque-abierto-500-lts-eavr-500-infraplast-1111801p>> [Consulta: 30 de enero de 2018]
- [58] Estudio asegura que Chile es el segundo país con mayores tarifas eléctricas de Sudamérica. Emol. [En línea] <<http://www.emol.com/noticias/Nacional/2017/07/18/867228/Chile-es-el-segundo-pais-con-mayores-tarifas-electricas-de-Sudamerica.html>> [Consulta: 27 de agosto de 2018]
- [59] Tabla de Vida Útil de los bienes físicos del activo inmovilizado. Servicio de Impuestos Internos. [En línea] <[http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/bienes\\_f.htm](http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/bienes_f.htm)> [Consulta: 31 de agosto de 2018]
- [60] Simulador de crédito de consumo personal. Banco Estado. [En línea] <[https://www.bancoestado.cl/imagenes/nuevo\\_form/11394\\_simulador\\_consumo/solicitud.asp](https://www.bancoestado.cl/imagenes/nuevo_form/11394_simulador_consumo/solicitud.asp)> [Consulta: 31 de agosto de 2018]
- [61] Servicio Proyecto de Paneles Solares instalados. Sodimac. [En línea] <<http://www.sodimac.cl/sodimac-cl/content/a1270001/Generacion-de-Energia-Fotovoltaica?gclid=EAlaIQobChMI5s6YqouC2QIVjYGRCh2E7AxuEAAYA%E2%80%A6>> [Consulta: 27 de agosto de 2018]



## 8. Anexos

### 8.1. Encuesta realizada en Carrizalillo



 **fcfm** Ingeniería Química,  
Biotecnología y Materiales  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**Encuesta a Población de Carrizalillo/Chañaral de Aceituno**

Nombre del Encuestado: .....

Edad: ..... Sexo: ..... Residente estable: .....

Si su respuesta fue no, ¿Cuánto tiempo al año reside?:  
.....  
.....  
.....

1. ¿Considera que actualmente la zona presenta problemas hídricos? ¿Por qué?:  
.....  
.....  
.....  
.....

2. ¿Cuánto gasta en agua potable al mes? ¿Qué uso le da a esta?:  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

3. ¿Tienen acceso a frutas y vegetales en la zona? Mencione cuales:  
.....  
.....  
.....

Este documento es privado y será utilizado sólo con fines académicos.

4. ¿Qué opina del uso de energía solar, eólica o mareomotriz?

.....

.....

.....

.....

.....

5. ¿Cómo observa el desempleo de la zona?

.....

.....

.....

Este documento es privado y será utilizado sólo con fines académicos.

*Imagen 6. Encuesta realizada en las localidades.*

### 8.2. Demanda hídrica de la zona

A partir de una visita realizada a la planta de desalinización de agua de pozo en Carrizalillo, se obtuvieron los consumos totales de las localidades de Carrizalillo y de Caleta Chañaral de Aceituno el fin de semana largo del 31 de octubre del 2018, en la siguiente tabla se muestran dichos valores:

Tabla 6. Demanda hídrica diaria de Carrizalillo.

| Fecha dd/mm/aa                        | 29/10/18 | 30/10/18 | 31/10/18 | 01/11/18 | 02/11/18 | 03/11/18 | 04/11/18 |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Demanda hídrica [m <sup>3</sup> /día] | 59       | 68       | 36       | 46       | 40       | 42       | 38       |

En la Tabla 7, se enseña el consumo diario en caleta Chañaral de Aceituno para los mismos días:

Tabla 7. Demanda hídrica diaria de caleta Chañaral de Aceituno.

| Fecha dd/mm/aa                        | 29/10/18 | 30/10/18 | 31/10/18 | 01/11/18 | 02/11/18 | 03/11/18 | 04/11/18 |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Demanda hídrica [m <sup>3</sup> /día] | 82       | 38       | 119      | 110      | 66       | 65       | 64       |

### 8.3. Consumo de cultivos en la zona

La encuesta realizada permitió conocer también el consumo de tomates y lechugas en la zona, cabe destacar que los pobladores tienen acceso a este tipo de alimento fresco una vez por semana. Los lunes llega un camión con alimentos, estos son distribuidos en un almacén de Carrizalillo y otro de caleta Chañaral de Aceituno. En las Tabla 8 y Tabla 9 se enseñan el consumo por familia, lo que permitiría calcular el consumo per cápita.

Tabla 8. Consumo de tomate por habitante en el sector.

| Consumo semanal de tomates<br>[ $\frac{kg}{semana}$ ] | Cantidad de personas que consumen<br>[hab] |
|---|--|
| 8   | 5  |
| 4   | 3  |
| 2   | 1  |
| 2   | 1  |
| 3   | 4  |
| 4   | 3  |
| 4   | 2  |
| 1   | 1  |
| 2   | 3  |
| 1   | 2  |

Considerando que un mes tiene una semana y que aproximadamente 5 tomates corresponden a un kilogramo, se obtiene el consumo aproximado de tomates en la zona:

$$\text{Consumo estimado} = \left( \frac{\sum \frac{\text{Consumo semanal} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{semana}} \right]}{\text{Consumidores} [\text{hab}]} }{\text{Total de la muestra}} \right) \cdot \frac{4 [\text{semanas}]}{1 [\text{mes}]} \cdot \frac{5 [\text{tomates}]}{1 [\text{kg}]} \quad (7)$$

La Ecuación 7, aplicada a la Tabla 8 da un total de 27 tomates al mes por habitantes.

Repitiendo el mismo procedimiento para las lechugas, se obtienen los siguientes valores:

Tabla 9. Consumo de lechugas por habitantes en el sector.

| Consumo semanal de lechugas<br>[lechugas]<br>[semana] | Cantidad de personas que consumen<br>[hab] |
|---|--|
| 6   | 5  |
| 1   | 3  |
| 1   | 1  |
| 1   | 1  |
| 1   | 4  |
| 3   | 3  |
| 3   | 2  |
| 1   | 4  |
| 2   | 2  |
| 2   | 3  |
| 3   | 6  |
| 1   | 5  |
| 3   | 5  |
| 1   | 2  |

Con los valores de la Tabla 9 se procede a hacer la misma estimación:

$$\text{Consumo estimado} = \left( \frac{\sum \frac{\text{Consumo semanal} [\text{lechuga}]}{\text{Consumidores} [\text{hab}]} }{\text{Total de la muestra}} \right) \cdot \frac{4 [\text{semanas}]}{1 [\text{mes}]} \quad (8)$$

La Ecuación 8 entrega como resultado el consumo aproximado de 3 lechugas por habitantes al mes.

#### 8.4. Comparación de cultivos

A continuación, se detalla el análisis realizado de en cultivos de tomates y lechugas mediante la metodología convencional y la hidroponía:

##### 8.4.1. Cultivo de tomate convencional

A partir de bibliografía se obtiene el uso de fertilizante para un cultivo de tomates en tierra, para simplicidad comparativa se utilizarán los datos en [kg/unidad]/mes:

$$\text{Mezcla NPK (N: 10\% P: 30\% K: 10\%)} = 1,80 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{unidad}} \right] / \text{mes}$$

$$\text{Urea (N: 46\%)} = 5,33 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{unidad}} \right] / \text{mes}$$

$$\text{Nitrato de Calcio (N: 15,5\% Ca: 18,7\%)} = 2,00 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{unidad}} \right] / \text{mes}$$

$$\text{Nitrato de potasio (N: 13\% K: 38,2\%)} = 3,00 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{unidad}} \right] / \text{mes}$$

Tabla 10: Consumo de macronutrientes para tomate en tierra.

| Especie | Nitrógeno            | Fósforo              | Potasio              | Unidad                                   |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|--|
| Tomate  | $4,95 \cdot 10^{-4}$ | $5,40 \cdot 10^{-4}$ | $2,95 \cdot 10^{-4}$ | $[[\text{kg}/\text{unidad}]/\text{mes}]$ |

Sumado a los resultados anteriores, se agrega el consumo hídrico registrado por la bibliografía:

$$\text{Consumo Hídrico: } 0,78 \left[ \frac{\text{L}}{\text{unidad}} \right] / \text{mes}$$

#### 8.4.2. Cultivo de lechuga convencional

A diferencia de los datos anteriores, la bibliografía entrega los datos específicos de los macronutrientes:

Tabla 11. Consumo de macronutrientes para lechuga en tierra.

| Especie | Nitrógeno            | Fósforo              | Potasio              | Unidad                                   |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|--|
| Lechuga | $1,64 \cdot 10^{-3}$ | $5,62 \cdot 10^{-4}$ | $5,62 \cdot 10^{-4}$ | $[[\text{kg}/\text{unidad}]/\text{mes}]$ |

Además, se tiene que el consumo de agua para la especie es:<sup>[21]</sup>

$$\text{Consumo Hídrico: } 3,87 \left[ \frac{\text{L}}{\text{unidad}} \right] / \text{mes}$$

#### 8.4.3. Cultivo de tomate hidropónico

Para los cultivos hidropónicos se tienen los valores específicos de la cantidad de macronutrientes que consumen, en el caso de los tomates se tiene lo presentado en la Tabla 12:

Tabla 12. Macronutrientes consumidos por cultivos de tomates hidropónicos.

| Especie   | Nitrógeno            | Fósforo              | Potasio              | Unidad                                   |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|--|
| Tomate H. | $5,58 \cdot 10^{-5}$ | $5,98 \cdot 10^{-6}$ | $9,49 \cdot 10^{-5}$ | $[[\text{kg}/\text{unidad}]/\text{mes}]$ |

También se tiene que el consumo hídrico de los cultivos corresponde a:<sup>[18]</sup>

$$\text{Consumo Hídrico: } 0,51 \left[ \frac{L}{\text{unidad}} \right] / \text{mes}$$

#### 8.4.4. Cultivo de lechuga hidropónica

Finalmente, para la lechuga se tendrá que el nitrógeno se agrega como  $N-NO_3^-$ , a continuación, la Tabla 13 resume el consumo de macronutrientes.

Tabla 13. Macronutrientes consumidos por cultivos de lechuga hidropónica.

| Especie    | Nitrógeno            | Fósforo              | Potasio              | Unidad              |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Lechuga H. | $3,57 \cdot 10^{-4}$ | $1,07 \cdot 10^{-4}$ | $4,54 \cdot 10^{-4}$ | $[[kg/unidad]/mes]$ |

El consumo de agua corresponde a:<sup>[19]</sup>

$$\text{Consumo Hídrico: } 1,09 \left[ \frac{L}{\text{unidad}} \right] / \text{mes}$$

#### 8.5. Obtención de agua por evo-transpiración

Para obtener el flujo de agua que se pierde por cultivo, es necesario aplicar la siguiente expresión <sup>[22]</sup>:

$$ET_c = ET_r \cdot K_c \quad (9)$$

En donde la evo-transpiración del cultivo ( $ET_c$ ) depende proporcionalmente de una evo-transpiración teórica o de "referencia" ( $ET_r$ ) y el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ).

##### 8.5.1. Obtención de coeficiente de cultivo

El  $K_c$  depende principalmente de tres factores:  $K_{min}$  y  $K_{c\max}$ , ambos propios de la especie a cultivar y  $TTA$  que corresponde al tiempo térmico acumulado desde emergencia. Este último valor depende de distintas temperaturas que serán explicadas más adelante. A continuación, se muestra el cálculo de  $K_c$  respecto a los factores anteriores:<sup>[29]</sup>

$$\text{Si } TTA < 200 \quad K_c = 0,2 \quad (10)$$

$$\text{Si } 200 \leq TTA \leq 722 \quad K_c = K_{min} + 0,00268 \cdot (TTA - 200) \quad (11)$$

$$\text{Si } TTA > 722 \quad K_c = K_{c\max} \quad (12)$$

La obtención de  $TTA$  depende de las temperaturas mínimas y máximas diarias, además de tres valores característicos de cultivos: la temperatura base ( $T_b$ ), que corresponde a la mínima temperatura a la que el cultivo comienza el metabolismo, la temperatura óptima ( $T_{op}$ ), la cual es el valor de temperatura con mayor desarrollo del cultivo y la temperatura umbral superior ( $T_{us}$ ), valor para el cual el cultivo muere al ser superado. A continuación, se muestra el cálculo de  $TTA$ :

$$\text{Si } T_{m\max} < T_{op} \text{ y } T_{m\min} < T_b \quad (13)$$

$$TT = \frac{(T_{m\acute{a}x} - T_b)^2}{2 \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})}$$

Si  $T_{m\acute{a}x} < T_{op}$  y  $T_{m\acute{i}n} > T_b$

$$TT = 0,5 \cdot (T_{m\acute{i}n} + T_{m\acute{a}x}) - T_b \quad (14)$$

Si  $T_{m\acute{a}x} > T_{op}$

$$TT = \frac{1}{(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})} \cdot \left[ \frac{(T_{op} - T_{m\acute{i}n})^2}{2} + (T_{m\acute{i}n} - T_b) \cdot (T_{op} - T_{m\acute{i}n}) \right] \quad (15)$$

$$+ \left( (T_{m\acute{a}x} - T_{op}) \cdot (T_{op} - T_b) \cdot \left( 0,5 + \frac{0,5 \cdot (T_{us} - T_{m\acute{a}x})}{T_{us} - T_{op}} \right) \right) \quad (16)$$

$$TTA = \sum_0^t TT_t$$

### 8.5.2. Cálculo de coeficiente de cultivo

A partir de un promedio de la zona se obtiene el promedio anual de las temperaturas máximas y mínimas correspondientes a 15,41 °C y 19,50 °C para la costa del lugar de estudio.

En la Tabla 14 se resumen los parámetros respectivos a cada especie de cultivo y su coeficiente respectivo: <sup>[22][30][31]</sup>

Tabla 14. Parámetros de Kc para cultivos.

| Especie | $T_{us}$ | $T_b$ [°C] | $T_{op}$ [°C] | $K_{m\acute{i}n}$ | $K_{c\acute{m}a}x$ |
|---------|----------|------------|---------------|-------------------|--------------------|
| Tomate  | 30°C     | 6°C        | 16,5°C        | 0                 | 1,15               |
| Lechuga | 30°C     | 13°C       | 20,5°C        | 0                 | 1                  |

A partir de los datos de la Tabla 14 se obtiene que los coeficientes de cultivos para tomates y lechugas equivales a 1,15 y 1,22, respectivamente.

### 8.5.3. Obtención de evo-transpiración de referencia

Para la obtención del coeficiente  $ET_r$  es necesario utilizar la ecuación de Penman-Monteith:

$$\lambda \cdot ET_r = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (17)$$

En donde  $R_n$  corresponde a la radiación neta al que se ve expuesto el cultivo,  $G$  es el flujo de calor en el suelo,  $(e_s - e_a)$  es el déficit de presión de vapor del aire,  $\rho_a$  es la densidad media del aire a presión constante,  $c_p$  el calor específico del aire,  $\Delta$  la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación,  $\gamma$  constante psicrométrica y  $r_s$  con  $r_a$  son la resistencia superficial y aerodinámica, respectivamente. <sup>[23]</sup>

#### 8.5.3.1. Resistencia aerodinámica

Corresponde la resistencia del flujo de vapor de agua desde la superficie evaporante hacia el aire en el ambiente, está determinada mediante la siguiente expresión:

$$r_a = \frac{\ln \left[ \frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \cdot \ln \left[ \frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 \cdot u_z} \quad (18)$$

En la Ecuación 18  $z_m$  es la altura de medición del viento,  $z_h$  la altura de medición de humedad,  $d$  el plano de altura de desplazamiento cero,  $z_{om}$  la longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia de momentum,  $z_{oh}$  la longitud de rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor de agua,  $k$  corresponde a la constante de Von Karman, equivalente a 0,41 y finalmente,  $u_z$  la velocidad del viento a una altura  $z$ .

Es recomendado utilizar las siguientes relaciones a partir de la altura de cultivo  $h$ :

$$d = \frac{2}{3} \cdot h \quad (19)$$

$$z_{om} = 0,123 \cdot h \quad (20)$$

Se utilizó una altura de 1 [m] para ambos cultivos por sobre el nivel del mar, por lo que  $d = 0,67$  [m] y  $z_{om} = 0,12$  [m].

Para la longitud de rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor, existe la siguiente aproximación:

$$z_{oh} = 0,1 \cdot z_{om} \quad (21)$$

Por lo que tendría un valor de 0,01 [m].

Además, es recomendado utilizar  $z_m = z_h = 2$  [m], por lo que el único parámetro por fijar sería  $u_z$ . Este valor fue fijado con la herramienta on-line "earth nullschool" la cual entrega un valor aproximado de velocidad de viento en la zona, para el caso de estudio se considera  $u_z = 7,72$  [m/s].

Resolviendo la Ecuación 18 se tiene que la resistencia aerodinámica para ambos cultivos es de 8,61 [s/m].

#### 8.5.3.2. Resistencia superficial

Corresponde a la resistencia al flujo de vapor a través del cultivo transpirante y de la superficie evaporante del suelo. Es calculada mediante la siguiente expresión:

$$r_s = \frac{r_l}{IAF_{activo}} \quad (22)$$

En donde  $r_l$  corresponde a la resistencia estomática total de una hoja bien iluminada e  $IAF_{activo}$  es el índice activo de área foliar, una cantidad que representa el área superior de la hoja por unidad de área bajo ella.

Debido a que el índice activo sólo representa el área superior, una ecuación para obtener el índice activo foliar vendría dada por:



$$IAF_{activo} = 0,5 \cdot IAF \quad (23)$$

Sin embargo, se puede utilizar la siguiente aproximación:

$$IAF_{activo} = 12 \cdot h \quad (24)$$

En donde  $h$  representa la altura del cultivo, es decir 1 [m] en ambos casos.

La resistencia estomática  $r_l$  tiene un valor alrededor de 100 [s/m] bajo condiciones bien regadas, debido a que se trabajan con cultivos hidropónicos, se asumirá que los cultivos lo están, por lo que la resistencia superficial tiene un valor de 8,33 [s/m].

#### 8.5.3.3. Parámetros atmosféricos

Debido a que los cultivos serán situados en las cercanías de la costa, es correcto considerar que la presión sobre ellos será de 101,3 [kPa], cabe destacar que la ecuación general de la presión está dada por:

$$P = 101,3 \cdot \left( \frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right)^{5,26} \quad (25)$$

Donde  $z$ , es la elevación por sobre el nivel del mar.

Otro parámetro interesante corresponde al calor latente de vaporización  $\lambda$ , este depende de la temperatura y la presión del ambiente. Como varía levemente dentro del rango de temperatura de la zona, se considera que tiene un valor constante igual a 2,45 [MJ/kg] para simplificar el sistema.

A partir de los resultados anteriores es posible obtener la constante psicrométrica  $\gamma$ , la cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\epsilon \cdot \lambda} \quad (26)$$

En donde  $c_p$  corresponde al calor específico a presión constante con un valor de  $1,013 \cdot 10^{-3}$  [MJ/kg°C] y  $\epsilon$  el cociente del peso molecular de vapor de agua y aire seco, correspondiente a 0,622.

Obteniendo así, una constante  $\gamma = 0,07$ .

#### 8.5.3.4. Presión media de vapor de la saturación

La presión de saturación puede ser calculada en función de la temperatura del aire, la relación entre ambas variables es la siguiente:

$$e^0(T^\circ) = 0,6108 \cdot \exp \left[ \frac{17,27 \cdot T^\circ}{T^\circ + 237,3} \right] \quad (27)$$

A partir de las temperaturas mínimas y máximas enseñadas en el Anexo 8.5.2, se obtiene la presión de saturación mínima y máxima. De esta forma la presión media viene dada por:

$$e_s = \frac{e^0(19,5^\circ\text{C}) + e^0(15,41^\circ\text{C})}{2} \quad (28)$$

Teniendo un valor de 0,26 [kPa].

#### 8.5.3.5. Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor

La pendiente de la relación entre la presión de vapor y la temperatura viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{4.098 \cdot [0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T^\circ}{T^\circ + 237,3}\right)]}{(T^\circ + 237,3)^2} \quad (29)$$

En donde la temperatura utilizada corresponde a la media del aire, es decir 17,45 °C. Por lo que la pendiente tiene un valor de 0,13 [kPa/°C].

#### 8.5.3.6. Presión real de vapor

Existen tres formas de obtener  $e_a$ , para el caso de estudio, se utilizará la siguiente:

$$e_a = e^0(T^\circ_{\text{rocío}}) \quad (30)$$

La temperatura relativa a su vez se obtiene de otra ecuación:

$$T^\circ_{\text{rocío}} = \left(\frac{HR_{\text{media}}}{100}\right)^{1/8} \cdot (110^\circ\text{C} + T^\circ_{\text{media}}) - 110^\circ\text{C} \quad (31)$$

Utilizando una humedad relativa media  $HR_{\text{media}}$  de 81,85% obtenida a partir de las mediciones mensuales del año 2017 en la comuna de Freirina, Región de Atacama. Se obtuvo una temperatura de rocío de 14,3 °C. [32]

De esta forma, la presión real de vapor corresponde a 1,63 [kPa].

#### 8.5.3.7. Obtención de la radiación neta

Corresponde a la diferencia entre la radiación entrante y saliente de longitudes de onda cortas y largas. Para su cálculo es necesario la definición de distintos conceptos.

Radiación solar o de onda corta  $R_s$  corresponde a la radiación que llega a un plano horizontal en la superficie terrestre, para un día despejado constituye aproximadamente el 75% de la radiación extraterrestre, en un día nublado es cerca del 25%.

La radiación extraterrestre se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r [\omega_s \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega)] \quad (32)$$

En donde  $G_{sc}$  corresponde a la constante solar con valor 0,082 [MJ/min m<sup>2</sup>],  $d_r$  la distancia relativa inversa Tierra-Sol,  $\omega_s$  el ángulo de radiación a la puesta de sol,  $\varphi$  la latitud en radianes y  $\delta$  la declinación solar en radianes.

La distancia relativa y la declinación solar están dadas por las siguientes expresiones:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J\right) \quad (33)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad (34)$$

En donde  $J$  corresponde al día del año, desde 1 como el primero de enero y 365 el 31 de diciembre. Para los cálculos se utilizó  $J = 1$  arbitrariamente. Los valores entonces están dados por  $d_r = 1,03$  y  $\delta = -0,4$ .

El ángulo de radiación a la hora de la puesta de sol está dado por:

$$\omega_s = \text{arcos}[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (35)$$

Donde  $\varphi$  tiene un valor de 0,57 radianes, por lo que  $\omega_s$  equivale a 1,29 radianes.

De esta forma la radiación extraterrestre es  $R_a = 18,2 [MJ/\text{día } m^2]$

Siguiendo con el análisis, es necesario calcular la radiación solar, esta puede ser medida diariamente con instrumentos o puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$R_s = \left(a_s + b_s \cdot \frac{n}{N}\right) \cdot R_a \quad (36)$$

Donde  $n$  es la duración real de la insolación en horas,  $N$  la duración máxima posible de insolación en horas,  $a_s$  una constante de regresión que expresa la fracción de radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados,  $b_s$  es equivalente a lo anterior, pero en días despejados. Por recomendación de bibliografía  $a_s = 0,25$  y  $b_s = 0,5$ .

El valor  $N$  se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$N = \frac{24 \cdot \omega_s}{\pi} \quad (37)$$

Por lo que tiene un valor de 9,87 horas. Para efectos del diseño de la planta se considerará un funcionamiento de 8 horas, por lo que  $n$  tiene un valor de 8 horas.

El valor de la radiación solar entonces es de  $11,92 [MJ/\text{día } m^2]$ .

Se define la radiación neta de onda corta como el equilibrio entre la radiación solar entrante y reflejada, esta está dada por:

$$R_{ns} = (1 + \alpha) \cdot R_s \quad (38)$$

Donde se recomienda utilizar un valor  $\alpha$  de 0,23. Obteniéndose una radiación neta de onda corta  $9,18 [MJ/\text{día } m^2]$ .

También se define la radiación solar en un día despejado como parámetro de obtención de la radiación neta de onda larga.

$$R_{so} = (a_s + b_s) \cdot R_a \quad (39)$$

Teniendo un valor de 13,65 [MJ/día m<sup>2</sup>].

La radiación neta de onda larga se define como:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left( 1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (40)$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann igual a  $4,903 \cdot 10^{-9}$  [MJ/día K<sup>4</sup> m<sup>2</sup>], las temperaturas máximas y mínimas se encuentran en el Anexo 8.5.2 y  $e_a$  es calculado en el Anexo 8.5.3.6. El valor calculado corresponde a 4,68 [MJ/día m<sup>2</sup>].

Por último. la radiación neta está dada por:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (41)$$

Teniendo un valor de 4,5 [MJ/día m<sup>2</sup>].

#### 8.5.3.8. Flujo de calor del suelo

Finalmente, el flujo de calor tiene un valor de 0 debido a que no existe cultivo en tierra, sino que es hidropónico.

#### 8.5.4. Cálculo de evo-transpiración de referencia

Utilizando la Ecuación 17 se obtiene el valor  $ET_r$ :

$$ET_r = \frac{0,13 \left[ \frac{kPa}{^\circ C} \right] \cdot \left( 4,50 \left[ \frac{MJ}{día m^2} \right] - 0 \right) + 1,40 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{MN}{^\circ C m^2} \right] \cdot \frac{(0,26[kPa] - 1,63[kPa])}{8,61 \left[ \frac{día}{m} \right]}}{2,45 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] \cdot \left[ 0,13 \left[ \frac{kPa}{^\circ C} \right] + 0,07 \left( 1 + \frac{8,33 \left[ \frac{s}{m} \right]}{8,61 \left[ \frac{s}{m} \right]} \right) \right]}$$

Obteniéndose un valor de 0,90 [kg/día m<sup>2</sup>] para cada cultivo.

#### 8.5.5. Cálculo de agua por evo-transpiración

Utilizando la Ecuación 9 y el rendimiento de cultivo enseñado en la Tabla 1, se procede a calcular la pérdida de agua por evo-transpiración de las opciones:

$$ET_{tomate} = \frac{0,9 \left[ \frac{kg}{día m^2} \right] \cdot 1 \cdot 31 \left[ \frac{día}{mes} \right]}{127 \left[ \frac{unidad}{m^2} \right]} = 0,22 \left[ \frac{kg}{unidad mes} \right]$$

$$ET_{lechuga} = \frac{0,9 \left[ \frac{kg}{día m^2} \right] \cdot 1,22 \cdot 31 \left[ \frac{día}{mes} \right]}{18 \left[ \frac{unidad}{m^2} \right]} = 0,27 \left[ \frac{kg}{unidad mes} \right]$$

### 8.6. Estimación de tamaño de cultivo

Se estimó arbitrariamente que el consumo por habitante al mes de tomates y lechugas corresponde a 40 y 5 respectivamente. Para un pueblo como Carrizalillo con 200 personas esto se traduciría en lo siguiente considerando un mes de cuatro semanas:

$$N^{\circ} Tomates = 200 [hab] \cdot 27 \left[ \frac{unidades}{hab mes} \right] \cdot \frac{1}{4} \left[ \frac{mes}{semana} \right] = 1.350 \left[ \frac{unidades}{semana} \right]$$

$$N^{\circ} Lechugas = 200 [hab] \cdot 3 \left[ \frac{unidades}{hab mes} \right] \cdot \frac{1}{4} \left[ \frac{mes}{semana} \right] = 150 \left[ \frac{unidades}{semana} \right]$$

Considerando que un año normal consta de aproximadamente 52 semanas, se estaría hablando de un estimado de 70.200 tomates y 7.800 lechugas anualmente.

El periodo de cultivo de tomates corresponde a 21 semanas y el de lechuga a 10, por lo que para tener una oferta constante se realizaran ciclos de producción, es decir, se tendrán 21 puestos de elaboración de tomates y 10 de lechugas. <sup>[29][19][20]</sup>

Utilizando los datos presentados anteriormente y el rendimiento de cultivo de la Tabla 1, se obtiene el área de cultivo necesaria con un error del 80% para amortiguar el sistema:

$$\text{Área}_{Tom} = \left( \left( \frac{1.350 [unidades/semanas]}{127 [unidades/m^2]} \right) \cdot 21 [semanas] \right) \cdot \frac{1}{0,8} = 279 [m^2]$$

$$\text{Área}_{Lec} = \left( \left( \frac{150 \left[ \frac{unidades}{semanas} \right]}{18 \left[ \frac{unidades}{m^2} \right]} \right) \cdot 10 [semanas] \right) \cdot \frac{1}{0,8} = 104,2 [m^2]$$

Con esa superficie de cultivo se procede a calcular la cantidad de cultivo que se tendrá:

$$Tomates\ totales = 279 [m^2] \cdot 127 \left[ \frac{unidades}{m^2} \right] \approx 35.433 [unidades]$$

$$Lechugas\ totales = 104,2 [m^2] \cdot 18 \left[ \frac{unidades}{m^2} \right] \approx 1.876 [unidades]$$

Además, se procede a obtener la cantidad de agua requerida por los cultivos al mes:

$$\begin{aligned}
 Agua_{tomates} &= \left( 0,51 \left[ \frac{kg}{unidad\ mes} \right] + 0,21 \left[ \frac{kg}{unidad\ mes} \right] \right) \cdot 35.433 [unidades] \\
 &\approx 25.512 \left[ \frac{L}{mes} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Agua_{lechuga} &= \left( 1,09 \left[ \frac{kg}{unidad\ mes} \right] + 0,26 \left[ \frac{kg}{unidad\ mes} \right] \right) \cdot 1.876 [unidades] \\
 &\approx 2.533 \left[ \frac{L}{mes} \right]
 \end{aligned}$$

## 8.7. Diseño del proyecto

En el presente anexo se realiza una explicación detallada de cada etapa del proyecto, desde su captación misma, hasta el cultivo hidropónico. Es de suma importancia el entendimiento de esta sección para así poder realizar un seguimiento de los costos.

Todo comienza con la torre de captación, la cual tiene una forma cilíndrica hueca y se encuentra sumergida a 30 [m] de profundidad a 400 [m] desde la costa. Las dimensiones corresponden a: un radio externo de 0,5[m] y uno interno de 0,4[m], la altura de la estructura es de 1,5 [m]. Cabe destacar que en el mando presenta ventanillas tapadas por mallas, las cuales permiten el paso del agua hacia dentro y evitan que sólidos de gran tamaño u organismos como peces y crustáceos entren.

Luego se tienen 430 [m] de una tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) de un diámetro de 9 [cm], este es justificado mediante la cantidad de volumen total que debe ser transportado a través de la tubería y el volumen mismo de ella, anulando el posible “vacío” que se pueda generar dentro del conducto y no dañar la bomba de captación de agua.

En la planta se ubicarán dos bombas Shanghai Y&L Pump Co. Ltd modelo DA65/16 <sup>[33]</sup>, en donde solamente una estará en uso y la otra se tendrá como repuesto. El agua succionada será depositada en un estanque Aquatank Titan <sup>[34]</sup> con una capacidad de 35 [m<sup>3</sup>] el cual permite albergar la cantidad total de un día de operación.

La salida del tanque tiene conexión con una tubería de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de 10 [cm] centímetros de diámetro y un largo total de 12 [m] el cual se conecta con el equipo de filtro multimedia proporcionado por la empresa Inquinat Ltda, permitiendo la retención de sólidos disueltos con un tamaño de hasta 10 [μm]. La etapa de filtración funciona con la ayuda de una bomba modelo Megachem de la empresa KSB con un consumo de 18 [kWh] <sup>[35]</sup>.

Nuevamente se tiene una conexión con tuberías de PRFV con las dimensiones mencionadas en el párrafo anterior. Posteriormente se tienen 15 unidades de filtros tipo cartucho, los cuales permiten la retención de sólidos disueltos con un tamaño de 5 [μm]. Una vez terminada esta etapa el caudal tratado se encuentra en condiciones óptimas para el proceso de osmosis inversa.

El proceso de desalinización se lleva a cabo en la estructura SW 6000 de la empresa Culligan con una potencia de 55 [kW] <sup>[36]</sup>. El equipo mencionado anteriormente <sup>[36]</sup> presenta una capacidad de 4 membranas en sus cartuchos, lo que permitiría tener dos circuitos paralelos con dos membranas en serie. Se contarán con 5 membranas Filmtec SW30-HR20 <sup>[37]</sup>, de las cuales se usarán cuatro y se tendrá una de repuesto. Finalmente debido a las altas presiones que involucran esta etapa, se considera una bomba CATPump modelo 5CP6120 <sup>[38]</sup>.

Adicionalmente a la etapa de osmosis inversa, se consideran dos estanques, uno para la salmuera con una capacidad de 5.000 [L] debido a que esta corresponde al residuo más problemático del proceso. El otro estanque puede albergar 500 [L] de detergentes, los cuales serán utilizados para la limpieza de incrustaciones en la etapa.

Finalmente, se considera una tubería de PVC con 11 [cm] de diámetro y un largo de 5,2 [km], este conducto serviría para llevar el agua desalinizada a Carrizalillo.

## 8.8. Evaluación económica del proyecto

Para realizar el estudio de factibilidad económica, es necesario calcular diversos costos y ganancias que se obtendrán a partir de la puesta en marcha del proyecto, a continuación, se detallará dicho análisis.

### 8.8.1. Venta de cultivo

La idea principal del proyecto es disminuir lo más posible el coste para los habitantes de Carrizalillo, es por esto que se utiliza como referencia el precio de venta encontrado en la vega central de Santiago.

En el caso del tomate, se tiene un valor de 980 [CLP/kg], considerando un tomate medio, la unidad tiene una masa aproximada de 120 [g], por lo que el valor unitario rondaría los 118 [CLP/unidad]. En el caso de la lechuga, el valor unitario es de 890 [CLP/unidad].<sup>[39][40][41]</sup>

Utilizando la información proporcionada en el Anexo 8.6, se obtiene la cantidad de tomates y lechugas que pueden venderse en un año, por lo que considerando que se vende la totalidad de producto se tendrían las siguientes ganancias anuales:

$$\begin{aligned} \text{Ganancia}_{\text{tomate}} &= 35.433[\text{unidad}] \cdot 118 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{unidad}} \right] \cdot \frac{12 \left[ \frac{\text{mes}}{\text{año}} \right]}{4,7 [\text{mes de cultivo}]} \\ &= 10.675.134 [\text{CLP/año}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ganancia}_{\text{lechuga}} &= 1.876[\text{unidad}] \cdot 890 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{unidad}} \right] \cdot \frac{12 \left[ \frac{\text{mes}}{\text{año}} \right]}{2,1 [\text{mes de cultivo}]} \\ &= 9.540.800 [\text{CLP/año}] \end{aligned}$$

### 8.8.2. Costos capitales de construcción para cultivo

Se utilizó como referente una evaluación económica en un invernadero de lechugas hidropónicas en la décima región. A partir de esta bibliografía, se estima un costo de 3.800.700 [CLP] para la construcción de la estructura considerando: Cercas de pino, soleras, raider, ventadas, pies derechos, cadenas, costaneras, canaletas, polietileno, malla Raschel, clavos y alambre. Esto para una superficie de una hectárea. Por motivos de escala se considerará sólo la mitad de este costo, debido a que el área de los cultivos del proyecto es mucho menor. Además, se considera un costo de mano de obra equivalente a 1.500.000 [CLP].<sup>[42]</sup>

$$\text{Costo Construcción} = \frac{3.800.700[\text{CLP}]}{2} + 1.500.000[\text{CLP}] = 3.400.400[\text{CLP}]$$

Es necesario considerar un contenedor capaz de almacenar agua para cultivo, para esto se cuenta con un estanque de 20 [m<sup>3</sup>], este tiene un valor de 2.690.000 [CLP].<sup>[43]</sup>

Además, se considera calefacción e instalación de la luz, ambos valores se consideran para una hectárea, por lo que se considera la mitad de este costo nuevamente y la mano de obra necesaria:

$$\text{Costo Instalación Luz} = \frac{450.000 [\text{CLP}]}{2} + 300.000[\text{CLP}] = 525.000 [\text{CLP}]$$

$$\text{Costo Instalación Calefacción} = \frac{641.908 [\text{CLP}]}{2} + 250.000[\text{CLP}] = 551.000 [\text{CLP}]$$

Considerando que cada planta tiene un total de 53 tomates y que son necesarios 35.433 tomates, es necesario contar con aproximadamente 669 plantas en total. Como se puede observar en la Figura 7, la plantación de tomates se elabora en bidones, estos tienen un precio unitario de 4.390 [CLP], por lo que el costo de estos sería:<sup>[18][44]</sup>

$$\text{Costo Planta de Tomate} = 669 \cdot 4.390[\text{CLP}] = 2.936.910[\text{CLP}]$$



Figura 7. Cultivo de tomate hidropónico.

Para el cultivo de lechugas, se considerarán cajones con dimensiones 1,9[m]x0,9[m]x0,3[m] cubiertos de plástico para evitar las filtraciones de agua. Los cajones serán construidos a partir de planchas de terciado estructural con medidas de 1,22[m]x2,44[m] elaboradas a partir de pino con precio de mercado de 10.990 [CLP]. Además, es necesario plástico negro galga 1000, el cual tiene un valor de 1.000 [CLP] para cada cajón. La cantidad necesaria de lechugas es de 1.876 como se estimó en el Anexo 8.6 por lo que la cantidad de cajones necesarios son:<sup>[42][45]</sup>

$$N^{\circ} \text{Cajones}_{\text{lechugas}} = \frac{1.876 [\text{unidades}]}{18 \left[ \frac{\text{unidades}}{\text{m}^2} \right] \cdot 1,9[\text{m}] \cdot 0,9[\text{m}]} \approx 61 \text{ cajones}$$



Para cada cajón es necesario tener 2 caras de  $1,9[m] \times 0,3[m]$ , 2 caras de  $0,9[m] \times 0,3[m]$  y 1 cara de  $1,9[m] \times 0,9[m]$ . En total se necesita una superficie de  $3,39 [m^2]$  de plancha para la elaboración de un cajón. El terciado estructural provee un área de  $2,98 [m^2]$ , por lo que para los 61 cajones se debe tener aproximadamente 70 planchas de pino.

El costo total para la elaboración de los cajones es de  $830.300 [CLP]$ , debido a que además cada cajón debe tener un plástico para evitar filtraciones.



Figura 8. Cultivo en cajones de lechugas hidropónicas.

### 8.8.3. Costos operacionales para cultivo

Cada planta de lechuga y tomate necesita una esponja de poliuretano para ser sostenida y mejorar el área de absorción de agua en el método hidropónico. La cantidad de esponjas anuales se calcula como:

$$N^{\circ} \text{ Esponjas} = \left( \frac{669[\text{planta}_{\text{tomate}}]}{21 [\text{semana}_{\text{cultivo}}]} + \frac{1.876[\text{planta}_{\text{lechuga}}]}{10 [\text{semana}_{\text{cultivo}}]} \right) \cdot 52 \left[ \frac{\text{semana}}{\text{año}} \right] = 11.412$$

El precio unitario de cada esponja corresponde a  $667 [CLP]$ , por lo que el costo total de  $7.611.804 [CLP/\text{año}]$  debido a que las esponjas se consideran no reutilizables.<sup>[42]</sup>

Además, se obtienen la cantidad anuales de macronutrientes necesarios para la producción con los resultados obtenidos en el Anexo 8.4 para 70.200 tomates y 7.800 lechugas (Anexo 8.6), en la siguiente tabla se muestran estos valores:

Tabla 15. Consumo anual de macronutrientes.

| Especie | Nitrógeno | Fósforo | Potasio | Unidad   |
|---------|-----------|---------|---------|----------|
| Tomate  | 47,00     | 5,04    | 79,94   | [kg/año] |
| Lechuga | 33,13     | 10,02   | 42,49   | [kg/año] |

Para abastecer a cada macronutriente se utilizan tres tipos de fertilizantes: Urea (46%), Superfosfato triple (46%) y KCL (60%). El precio unitario por kilogramo de cada especie es de 833 [CLP], 2.990[CLP] y 15.600 [CLP].<sup>[46][47][48]</sup>

El costo anual se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{Costo Nitrógeno}_{\text{Tomate}} = \left( \frac{47 \text{ [kg N / año]}}{0,46 \text{ [kg N/ envase]}} \right) \cdot 833 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{envase}} \right] = 85.111 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Costo Fósforo}_{\text{Tomate}} = \left( \frac{5,04 \text{ [kg P/año]}}{0,46 \text{ [kg P/ envase]}} \right) \cdot 2.990 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{envase}} \right] = 32.760 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Costo Potasio}_{\text{Tomate}} = \left( \frac{79,94 \text{ [kg K/año]}}{0,6 \text{ [kg K/ envase]}} \right) \cdot 15.600 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{envase}} \right] = 2.078.440 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Costo Nitrógeno}_{\text{Lechuga}} = \left( \frac{33,13 \text{ [kg N / año]}}{0,46 \text{ [kg N/ envase]}} \right) \cdot 833 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{envase}} \right] = 59.995 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Costo Fósforo}_{\text{Lechuga}} = \left( \frac{10,02 \text{ [kg P/año]}}{0,46 \text{ [kg P/ envase]}} \right) \cdot 2.990 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{envase}} \right] = 65.130 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{año}} \right]$$

$$\text{Costo Potasio}_{\text{Lechuga}} = \left( \frac{42,49 \text{ [kg K/año]}}{0,6 \text{ [kg K/ envase]}} \right) \cdot 15.600 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{envase}} \right] = 1.104.740 \left[ \frac{\text{CLP}}{\text{año}} \right]$$

Dando un total de 3.426.176 [CLP] al año.

#### 8.8.4. Costos capitales de planta de desalinización

Debido a que el proceso de desalinización se encuentra explicado equipo por equipo en el Anexo 8.7, se procederá a enlistar el precio de las etapas involucradas en la siguiente tabla:

Tabla 16. Costos capitales para planta desalinizadora.

| Origen del Costo   | Precio de costo [CLP] | Bibliografía Involucrada |
|--|-----------------------|--------------------------|
| Torre de captación   | 2.334.091             | [49]                     |
| Bomba de extracción DA65 Shanghai Y&L Pump Co. Ltd (2 unid.) | 2.900.000             | [33]                     |
| Tubería HDPE   | 3.163.500             | [50]                     |
| 2 estanques AquaTank Titan 35 [m <sup>3</sup> ]              | 4.000.000             | [34]                     |
| Tubería PRVD   | 29.470                | [51]                     |
| Filtro Multimedia Inquinat Ltda.                             | 1.793.330             | [52]                     |
| Bomba Megachem KSB (2 unid.)                                 | 2.800.000             | [53]                     |
| Tubería PVC  | 7.786.780             | [54]                     |
| Filtro Cartucho (15 unid.)                                   | 103.500               | [55]                     |
| SW 6000 Culligan   | 4.000.000             | [36]                     |
| Membranas SW30HR-320 (5 unid.)                               | 3.345.000             | [37]                     |
| Bomba CatPump 5CP6120  | 775.680               | [38]                     |
| Estanque Salmuera 5 [m <sup>3</sup> ]                        | 412.190               | [56]                     |
| Estanque Detergente 0,5 [m <sup>3</sup> ]                    | 76.830                | [57]                     |
| <b>TOTAL</b>   | <b>31.520.371</b>     |                          |

#### 8.8.5. Costos operacionales de planta de desalinización

Para poder determinar el total de costos operacionales de la planta, es necesario considerar el gasto por consumo eléctrico de los distintos equipos durante la operación anual. Se utilizó una tarifa de 97,53 [CLP/kWh] para el costo de energía eléctrica, siendo la tarifa para industrias de 59 [CLP/kWh] en Chile <sup>[58]</sup>.

Tabla 17. Costos operacionales para el proceso de desalinización.

| Equipo   | Potencia requerida [kW] | Costo energético anual [CLP] | Bibliografía |
|--|-------------------------|------------------------------|--------------|
| Bomba de extracción DA65 Shanghai Y&L Pump Co. Ltd | 26,43                   | 5.644.897                    | [33]         |
| Bomba Megachem KSB (2 unidades)                    | 26,40                   | 13.156.080                   | [35]         |
| Bomba CatPump 5CP6120                              | 6,43                    | 1.373.038                    | [38]         |
| <b>TOTAL</b>                                       | <b>85,66</b>            | <b>20.174.015</b>            |              |

Cabe destacar de la Tabla 17 que las potencias funcionan con una eficiencia del 70%, también que el tiempo de operación de cada bomba es de 6 horas al día, 365 veces al año. Por último, una de las bombas Megachem KSB funcionan durante dos horas extras al día para realizar un retrolavado en el filtro multimedia.

#### 8.8.6. Costos asociados a personal de trabajo

Para el funcionamiento de la planta y el cultivo se consideraron 4 personas, las cuales deben realizar la labor de supervisar la operación de la producción de agua y alimentos. Estas personas realizan su labor durante 6 horas durante a la semana, existe un operario que comienza a trabajar más tarde, debido a que es el encargado del retrolavado en el filtro multimedia. Se consideraron los siguientes trabajadores:

Tabla 18. Costos por salario de trabajadores.

| Puesto laboral               | Salario mensual [CLP] | Total anual [CLP] |
|------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Encargado de planta          | 900.000               | 10.800.000        |
| Supervisor de cultivo        | 700.000               | 8.400.000         |
| Supervisor de desalinización | 700.000               | 8.400.000         |
| Operador                     | 500.000               | 6.000.000         |
| Total                        | 2.800.000             | 33.600.000        |

#### 8.8.7. Depreciación de equipos

Respecto a la depreciación de bombas, estanques y equipos, se considera que presentan una vida útil de 15 años. Además, el porcentaje de depreciación corresponde a 4,7% del capital total de su inversión. No se consideró depreciación de tuberías ni de membranas dentro del análisis porque suponen bienes que no pueden ser vendidos luego de su uso. En la siguiente tabla se presenta el detalle de equipos:<sup>[59]</sup>

Tabla 19. Tabla de depreciaciones de bienes capitales.

| Bien Capital                           | Capital inicial [CLP] | Depreciación [CLP] |
|--|-----------------------|--------------------|
| Contenedor de agua para cultivos       | 2.690.000             | 126.430            |
| Construcción de Torre de Captación     | 334.091               | 15.072             |
| 2 Bombas de Captación de agua          | 2.900.000             | 136.300            |
| Tubería de HDPE para 450 [m] de Piping | 3.163.500             | 0                  |
| Estanque de recepción de agua te mar   | 2.000.000             | 94.000             |
| Tubería de PRFV para 12 [m] de Piping  | 29.470                | 0                  |
| Filtro multimedia                      | 1.793.330             | 84.287             |
| Bomba para Filtro Multimedia           | 1.400.000             | 65.800             |
| Tubería de PVC de 12 [m] de largo      | 38.780                | 0                  |
| 15 Filtro de Cartucho                  | 103.500               | 0                  |
| Bomba de Filtro Cartucho               | 1.400.000             | 65.800             |
| Estructura para la Osmosis Inversa     | 4.000.000             | 188.000            |
| 5 Membranas para la Osmosis Inversa    | 3.345.000             | 0                  |
| Bomba para Osmosis Inversa             | 775.680               | 36.457             |
| Estanque de Salmuera                   | 412.190               | 19.373             |
| Estanque de Detergente                 | 76.830                | 3.611              |
| Tubería PVC para Carrizalillo          | 7.748.000             | 0                  |

### 8.8.8. Cálculo de amortización

Utilizando la herramienta de simulación de crédito personal del Banco Estado, se realiza una simulación de préstamo de 40.000.000 [CLP] debido al límite de dinero que se puede pedir. Se destaca que este monto cubre el total de costos de inversión del proyecto, el cual fue mencionado en la Tabla 16. Se desea saldar la deuda en 24 meses y se comienza a pagar desde el primer mes. En la siguiente imagen se observan los detalles de la simulación:

|                               |                  |
|-------------------------------|------------------|
| Fecha                         | 05/03/2019 14:18 |
| Monto del Crédito             | \$40.000.000     |
| Número de Cuotas              | 24               |
| Pago Primera Cuota            | 01/04/2019       |
| Valor Cuota Mensual           | \$2.060.490      |
| Tasa de Interés Mensual(*)    | 1,67%            |
| Tasa de Interés Anual         | 20,04%           |
| Impuesto                      | \$322.586        |
| Notario                       | \$700            |
| Seguros ?                     | \$0              |
| Monto Total del Crédito       | \$40.323.286     |
| Costo total del Crédito (CTC) | \$49.451.777     |
| Carga Anual Equivalente       | 21,25%           |

Imagen 7. Detalles de simulación de crédito Banco Estado.

A partir de una tasa de interés del 20,04 % y pagando cuotas mensuales de 2.060.490 [CLP] se debe retornar un total de 49.451.777 [CLP].<sup>[60]</sup>

### 8.9. Estimación de paneles solares necesarios

Se consideran paneles solares con una producción de 375 [kWh/mes] los cuales tienen un costo unitario de 3.890.000 [CLP] <sup>[61]</sup>. Utilizando el valor total de la potencia requerida de la Tabla 17, se estima el consumo total anual de una planta al año:

*Consumo energético total*

$$\begin{aligned} &= 85,66 [kW] \cdot 6 \left[ \frac{h}{día} \right] \cdot 365[día] + 26,40 [kW] \cdot 2 \left[ \frac{h}{día} \right] \cdot 365[día] \\ &= 206.867,4 \left[ \frac{kWh}{año} \right] \end{aligned}$$

La generación energética de los paneles al año corresponde a:

$$\text{Generación energética total} = 375 \left[ \frac{kWh}{mes} \right] \cdot 12 \left[ \frac{mes}{año} \right] = 4.500 \left[ \frac{kWh}{año} \right]$$

Como casos de estudios, se desea abastecer el 33%, el 50% y el 100% de esta demanda. A continuación, se muestra el número de paneles necesarios para cada escenario y el precio correspondiente:

*Tabla 20. Casos de estudio para requerimientos de paneles solares.*

| <b>Demanda abordada</b> | <b>Número de paneles necesarios</b> | <b>Costo capital [CLP]</b> |
|-------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| 33%                     | 46                                  | 184.000.000                |
| 50%                     | 23                                  | 92.000.000                 |
| 100%                    | 15                                  | 60.000.000                 |

## 8.10. Desarrollo de Herramienta de Análisis Integral (HAIN)

Se procederá a realizar el análisis descrito en la sección 2.8 Para esto se hace necesario contestar las preguntas abordadas por la herramienta para evaluar desde una perspectiva distinta el proyecto a través de las distintas secciones enseñadas en la Figura 5.

### 8.10.1. Conciencia Social: ¿Realizaría esta acción si fuese parte de la comunidad afectada?

Actualmente en la zona se tienen problemas hídricos, los cuales empeoran en temporadas turísticas, por lo que tener una fuente de agua local que permita la distribución del recurso sería bastante beneficiosa.

Si la construcción de la planta de desalinización no tiene un impacto ambiental de ningún tipo, se cree que la comunidad aceptará el proyecto con los brazos abiertos. Es por esto que se hace primordial la utilización de paneles solares como fuentes de energías renovables y la obligación de hacerse cargo de la salmuera producida, dándole un nuevo uso o la correcta distribución de vuelta al océano.

Como parte de la comunidad, sería beneficioso contar con una oferta de alimentos obtenidos directamente de la zona. Esto podría mejorar la dieta de los habitantes del sector y traería beneficios para la gente que trabaja en restaurantes, puesto que tendrían frutas y verduras frescas durante toda la temporada.

### 8.10.2. Reflexión Crítica: ¿Cuáles son las consecuencias de este proyecto? ¿Qué precauciones se tienen que tener?

La principal consecuencia del proyecto corresponde a la mejora en la disposición de agua potable para los habitantes de Carrizalillo. Lo que puede significar un apoyo al actual suministro de agua que

se tiene, y que permitiría mejorar el servicio hacia la localidad de Caleta Chañaral de Aceituno. Las precauciones que se deben tener corresponden al constante mantenimiento de equipos y tuberías, principalmente para asegurar la distribución de agua que cumpla los estándares de calidad. Se destaca además, el cuidado que se debe tener con la salmuera, puesto que esta no puede ser arrojada al mar en un solo punto, ya que afectaría drásticamente a las formas de vida marina. Es por esto que se propone utilizarla para cultivos de aceituna, las cuales utilizan actualmente agua salobre en la zona para su desarrollo.

También se destaca la distribución de tomates y lechugas frescas en la zona. Actualmente se realiza un reparto de alimentos sólo los días lunes en Carrizalillo, por lo que los fines de semana la oferta es nula. Esto aumentaría la disponibilidad de frutas y verduras frescas a lo largo de la semana, mejorando la calidad de vida de los habitantes del sector, entregándoles una oportunidad de aumentar el consumo de frutas y verduras.

#### 8.10.3. Integración: ¿Qué conflicto podría despertar esta alternativa en las partes interesadas?

Principalmente se piensa que el actual proveedor de agua potable en la zona podría tener algún conflicto con el proyecto debido a que aumenta la competencia en el mercado. A pesar de que durante la visita a Carrizalillo la persona a cargo de la distribución actual se vio interesada en el proyecto, no se descarta un posible roce a futuro por lo explicado anteriormente.

Otra parte interesada que podría generar un conflicto corresponde a la población de Caleta Chañaral de Aceituno, principalmente porque ellos no se ven beneficiados con la construcción de la planta desalinizadora, al menos no directamente, puesto que el agua potable se encuentra actualmente destinada sólo para Carrizalillo. Además, la mayor parte de hombres de esta localidad forma parte del comité de pescadores de la zona, por lo que se debe tener especial cuidado en que la elaboración del proyecto no afecte de ninguna manera a los organismos marinos del sector.

#### 8.10.4. Creatividad: ¿Qué nuevas soluciones pueden hacerse? ¿Hay efectos no previstos?

Como se detalló en la sección 2.1 existen otras técnicas de desalinización de agua, sin embargo, la metodología de osmosis inversa corresponde a la más eficiente de estas. A pesar de esto, se podría evaluar la posibilidad de obtener el agua salobre de pozos subterráneos en la zona, ya que la concentración salina al ser menor, el proceso de desalinización conlleva un menor costo energético. Lamentablemente, la escasez hídrica en la región hace difícil la búsqueda de estas fuentes y no asegura la proporción a largo plazo.

Respecto a la obtención energética, podría utilizarse corriente eléctrica para el proceso, pero esto generaría un impacto ambiental y social. Recordando que Caleta Chañaral de Aceituno ha presentado cortes de electricidad, el utilizar el sistema interconectado del norte grande sólo empeoraría la situación. En cuanto a otras energías renovables no convencionales, el uso de energía eólica podría ser utilizado en la zona, aunque no se realizó un estudio de generación energética para poder compararlo a la fuente solar. Cabe destacar que esta opción tiene una dificultad alta en su traslado. La energía mareomotriz podría ser una opción de igual manera, sin embargo, no existen muchos estudios sobre esta tecnología en Chile, por lo que no se indagó más al respecto.

Finalmente, respecto a los cultivos agrícolas, se observó en la Tabla 1 la eficiencia de la metodología hidropónica en contraste al cultivo en tierra. A pesar de esto, existe una limitación en los tipos de frutas y verduras que podrían obtenerse a través del cultivo hidropónico. Por lo que si existe una fuerte demanda de otro tipo de alimento se deberá realizar el estudio correspondiente para observar la nueva rentabilidad económica del proyecto.

#### 8.10.5. Desarrollo Integral: ¿Se incluye en la toma de decisiones a todos los grupos sociales?

No, solamente se considera en la elaboración del proyecto a los grupos sociales pertenecientes a las localidades de Carrizalillo y Caleta Chañaral de Aceituno. Estos participantes se vieron interesados en el proyecto y se consideró su opinión a través de la encuesta mostrada en la sección 8.1. No se realizó ningún tipo de sesgo durante el estudio, de esta manera se entrevistaron: pescadores, dueños de locales, profesores, médicos, hombres, mujeres, gente de la tercera edad y jóvenes. Por lo que sí se involucró una alta proporción de grupos sociales de la zona. Sin embargo, no se realizó la encuesta a trabajadores de la municipalidad de Freirina, los cuales juegan un rol fundamental en la elaboración del proyecto.

#### 8.10.6. Desarrollo Equilibrado: ¿Se aporta de manera balanceada en todos los grupos sociales?

No, el aporte de agua potable está contemplado solamente para la población de Carrizalillo, por lo que otros grupos sociales no recibirán este aporte. Indirectamente, se espera que el servicio de agua potable actual mejore, lo que significaría un beneficio para Caleta Chañaral de Aceituno.

En cuanto al aporte de cultivos, las tres localidades tendrán acceso a esta de forma equitativa, no está contemplado hacer una diferenciación de precios. Por lo que si se considera que este beneficio es balanceado para los distintos grupos sociales.

#### 8.10.7. Desarrollo Sostenible: ¿Se compromete de alguna manera el desarrollo del futuro?

El proyecto tiene como objetivo mejorar la calidad de vida de las personas, brindando una fuente de agua potable a una zona con problemas de escasez hídrica. También se preocupa de disminuir el impacto ambiental utilizando una fuente de energía renovable, como lo es el uso de paneles solares.

Cabe destacar que el proyecto es rentable económicamente, por lo que a partir de las ganancias generadas puede aumentarse la capacidad de producción de agua potable para brindar este beneficio a las localidades cercanas de la planta a futuro. También se destaca que el estudio está enfocado en un proyecto modular que podría ser reproducido en distintas localidades costeras a lo largo del país y/o el mundo.

#### 8.10.8. Bien Común: ¿Cómo se afecta a la generación y distribución de riquezas sociales?

El efecto social que conlleva el proyecto sólo se ve en parte reflejado en la distribución de agua potable para la localidad de Carrizalillo. Dicho beneficio no tiene un fin netamente social, puesto que el servicio no es gratuito, al menos no durante la evaluación económica.

Por otra parte, los cultivos agrícolas se incluyen al proyecto para otorgarle a los pobladores una oferta nueva y constante en el mercado. A pesar de que esto puede traer un beneficio para los



habitantes de la zona. El fin de la venta de tomates y lechugas es generar una rentabilidad económica del proyecto.

Finalmente, la utilización de paneles solares reduce el impacto ambiental del proyecto considerablemente, lo cual no perjudica a las personas del sector, sobre todo a la población de Caleta Chañaral de Aceituno que actualmente tienen problemas con la energía eléctrica. Sin embargo, la idea de la utilización de energías renovables también nace del ahorro de costos operacionales de la planta.

En conclusión, a pesar de que el proyecto trae beneficios sociales a la gente de la zona, las decisiones tomadas se fundamentan por hacer posible la rentabilidad del mismo.